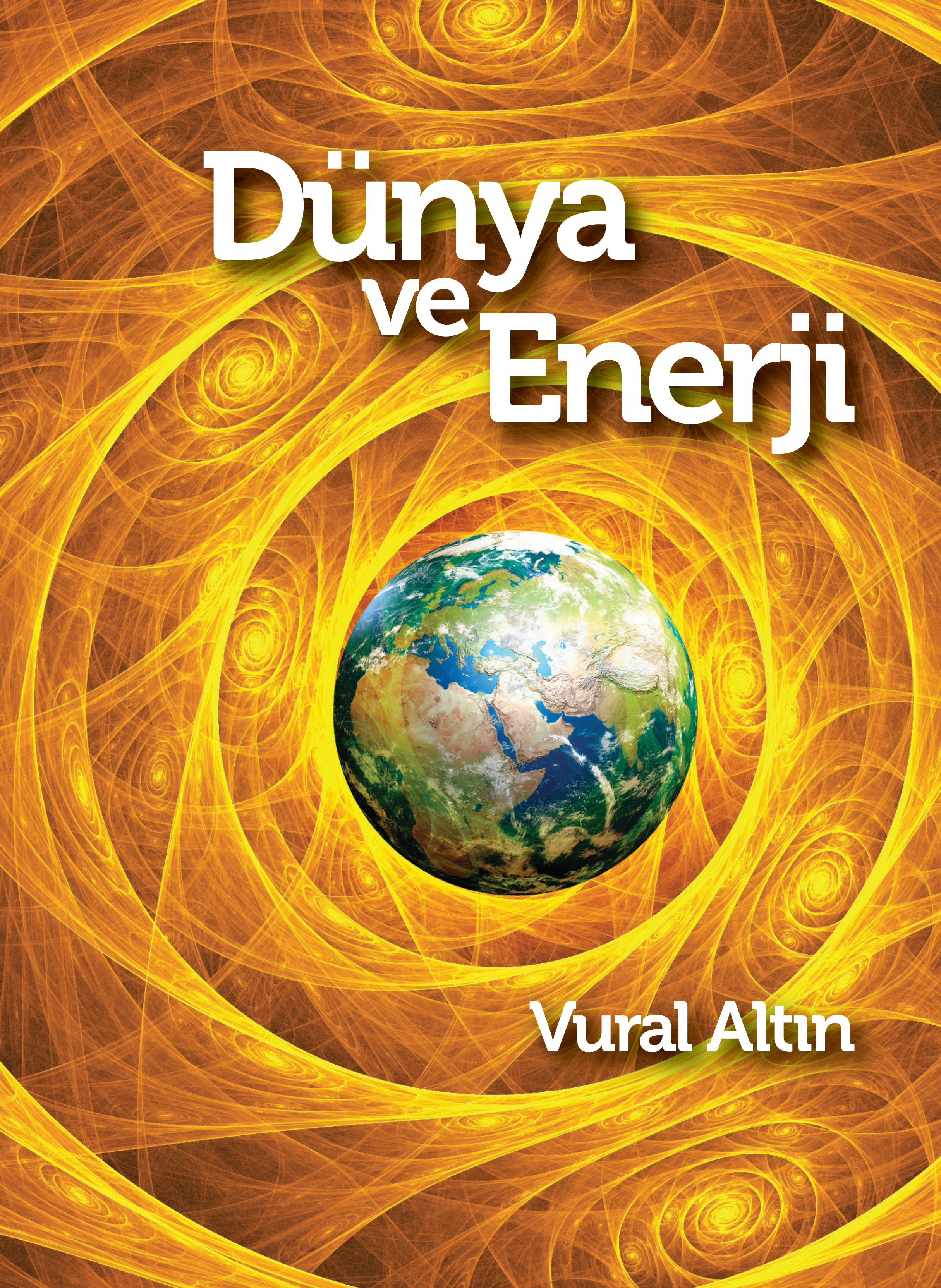


Dünya ve Enerji

Vural Altın

BOĞAZİÇİ ÜNİVERSİTESİ YAYINEVİ

DÜNYA VE ENERJİ

Bilim Yazıları

VURAL ALTIN

BOĞAZİÇİ
ÜNİVERSİTESİ
YAYINEVİ

Vural Altın
Dünya ve Enerji. Bilim Yazıları
© BÜTEK A.Ş. 2013. Tüm hakları saklıdır.

BÜTEK Boğaziçi Eğitim Turizm Teknopark Uyglama
ve Dan. Hiz. San. Tic. A.Ş.
Boğaziçi Üniversitesi Güney Kampüs, 7. Lojman,
3. Kat, P.K. 34342, Bebek-Beşiktaş/İstanbul
Telefon: 0212 359 46 30

Yönetim Yeri:
Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi
Boğaziçi Üniversitesi Uçaksavar Kampüsü
Garanti Kültür Merkezi, Arka Giriş
Etiler/İstanbul

bupress@boun.edu.tr
www.bupress.org
Telefon ve faks: (90) 212 257 87 27
Sertifika No: 10821

Genel Yayın Yönetmeni: Murat Gülsoy
Kapak tasarımı: Kerem Yeğin
Yayıma Hazırlayanlar: Meltem Aravi, Ergun Kocabıyık
Baskı: G.M. Matbaacılık ve Ticaret A.Ş.
100 Yıl Mah. Matbaacılar Sitesi, 1. Cadde, No: 88
Bağcılar/İstanbul
Telefon: (0212) 629 00 24
Sertifika No: 12358

Birinci Baskı: Mart 2013

Boğaziçi University Library Cataloging in Publication Data
Altın, Vural
Dünya ve enerji: bilim yazıları / Vural Altın.
328 p. ; 23 cm.

ISBN 978-605-4238-98-9

Includes index.
1. Science. 2. Power resources. 3. Nuclear energy. 4. Natural resources.
5. Science – Popular works.

Q125.A58

İÇİNDEKİLER

Sunuş ve Teşekkür, vii

DOĞRUSUNU BİLELİM, 9

TEMEL BİLİM STANDARTLARI, 18

DOĞAL BİRİMLER, 24

KARIŞIK BİRİMLER, 29

EVRENSEL SABİTLER, 35

DÜNYA'YI ÖLÇMEK, 41

DÜNYA'NIN İÇ YAPISI, 46

DÜNYA'NIN ATMOSFERİ, 52

ATMOSFER VE İKLİM, 59

SERA GAZLARI - 1, 65

SERA GAZLARI - 2, 68

GÖKYÜZÜ - 1, 72

GÖKYÜZÜ - 2, 79

OLUŞUM, 86

İZNİKLİ HİPPARKOS, 93

ZAMANIN DENKLEMİ, 100

DÜNYA'YI GERİ İTMEK, 107

DURGUN SULAR NEDEN SOĞUK, KANIN RENGİ NİYE BÖYLE?, 114

NEYİN BABASIYDI HEREDOT?, 121

FOSİL YAKIT ARİTMETİĞİ, 128

KÖMÜRÜN DİLİ OLSA..., 135

PETROL..., 142

HUBERT'İN ZİRVESİ'NDEN NASIL İNİLİR?, 148

DÜNYA'NIN GAZINI ALMAK, 155

DOĞALGAZ NE KADAR DOĞAL?, 162

DOĞALGAZIN TAŞINMASI, 169

ALTERNATİF KAYNAKLI KONUT GÜÇ SİSTEMLERİ, 176

DİNAMO, 181

EVLERE YEDEK SU, 183

FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİ, 190

KONUTLARDA MİKRO-HİDRO GÜÇ SİSTEMLERİ, 204

DEVR-İ DAİM MAKİNELERİ NEDEN ÇALIŞMAZ?, 210

KUANTUM ÖLÇÜMÜ SORUNU VE EVRETT'İN ÇOKLU DÜNYALARI, 234

PARÇACIĞI BULUN, 246

NÜKLEER SİLAH NASIL YAPILIR?, 248

MANHATTAN PROJESİ, 252

TORYUM DOSYASI, 264

URANYUM DÖNGÜSÜNÜ HATIRLAYALIM, 276

TAŞIMA PU'YLA BOMBA OLMAZ, 285

GERÇEK CASUSLUK ÖYKÜSÜNÜN ARDINDAKİ MADDE: POLONYUM 210, 292

IŞINETKİNLİK, 300

NÜKLEER SANTRAL İÇİN AYKIRI BİR SÖYLEŞİ, 302

ÇERNOBİL'DEN 20 YIL SONRA, 315

KAZA NASIL OLDU?, 320

Dizin, 354

Sunuş ve Teşekkür

2012 yılında beklenmedik şekilde aramızdan ayrılan Prof. Dr. Vural Altın'ın bilim yazılarının büyük bölümünü kapsayan *Dünya ve Enerji*, dünyanın iç yapısını, yeraltı kaynaklarını, atmosferini, sera gazlarını ele alan ve güncelliğini kolay kolay yitirmeyecek temel meselelerin yanı sıra devr-i daim makinelerinden Mahattan Projesi'ne, fotovoltaik güneş panellerinden alternatif kaynaklı konut güç sistemlerine uzanan birçok meraklı konuyu açık ve sade bir dille ele alıyor.

Prof. Dr. Vural Altın, üniversite eğitimini University of California, Berkeley'de İnşaat Mühendisliği alanında tamamladıktan sonra aynı üniversitede Nükleer Mühendislik alanında yüksek lisans ve doktora çalışmalarını yapmıştır. 1977 yılından emekli olduğu 2003 yılına dek Boğaziçi Üniversitesi'nde öğretim üyesi olarak çalışmış, çok sayıda uluslararası makale yayımlamıştır. Enerji mühendisliği alanında dersler vermenin yanı sıra *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*'nde yazdığı yazılarla yıllarca katkıda bulunmuştur.

Prof. Dr. Vural Altın, TASAM (Türk Asya Stratejik Araştırmalar merkezi) Türkiye'nin Stratejik Vizyonu 2023 Projesi Akil Kişiler Kurulu Üyeliği, TRNTP (TASAM Türkiye Nükleer Teknoloji Platformu) editörlüğü, Okan Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Başkanlığı ve TASAM Yönetim Kurulu Üyeliğini yürütmekteydi. Prof. Altın, 2009 yılında TASAM Stratejik Vizyon Sahibi Bilimadamı Ödülünü almıştı.

Bilim insanı olmanın sadece bilim ve teknolojinin zor problemleri üzerinde çalışmakla sınırlı olmadığını, bilgiyi her düzeyde paylaşmanın ve aktarmanın yaşamsal öneme sahip olduğunu savunan Altın'ın bu yazılarını kitap haline getirilmesinde önayak olan eşi Füsun Altın'a, kitabın hazırlanmasında desteğini esirgemeyen meslektaşı Dr. Yüksel Atakan'a ve yazıların arşivden araştırılıp toplanması ve bizlere iletilmesindeki çabaları ve işbirliği için *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi* yönetimine teşekkür ederiz.

Murat Gülsoy

DOĞRUSUNU BİLELİM

ABARTILMIŞ TORYUM

Toryum doğada, monazit ve torit mineralleri halinde bulunuyor. Güçlü alaşımların ve ultraviyole fotoelektrik gözelerin yapımında kullanılan bu ‘nadir toprak elementi’, hemen tümüyle T-232 izotopundan oluşuyor. Türkiye’nin, yaklaşık 380.000 tonluk rezerviyle dünyada, Hindistan’dan sonra en büyük rezerve sahip ülke olduğu sanılıyor. Fakat, T-232 izotopu ‘parçalanabilir’ bir çekirdek değil. Dolayısıyla, nükleer enerji üretimi amacıyla, doğrudan yakıt olarak kullanılması imkânsız. Ancak ‘doğurgan’ bir çekirdek. Termal nötron bombardımanı altında bir nötron yuttuktan sonra, iki beta bozunumundan geçerek, parçalanabilir olan U-233 çekirdeğine dönüşebiliyor:

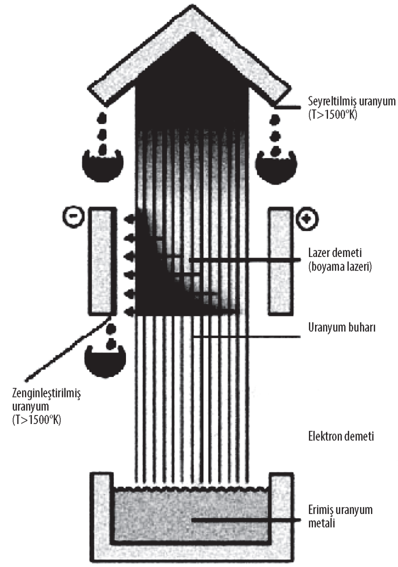
$${}_{90}T^{232} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{90}T^{233} + \gamma,\ {}_{90}T^{233} \rightarrow {}_{91}Pa^{233} + {}_{1}\beta^{0},\ {}_{91}Pa^{233} \rightarrow {}_{92}U^{233} + 2\,{}_{-1}\beta^{0}$$

Dolayısıyla, toryumu mevcut nükleer santrallerde doğrudan yakıt olarak kullanmak mümkün olmamakla birlikte, kalpteki U-235’ce zengin yakıt çubuklarının içine ya da yanına yerleştirerek, bir yandan U-235’ten enerji üretirken, diğer yandan T-232 izotoplarını U-233’e çevirmek mümkün. Bu U-233 çekirdekleri de zamanla fisyona uğrayacak, enerji üretimine katkıda bulunacaktır. Nitekim, Hindistan uzun zamandır zengin toryum rezervlerini değerlendirebilmek amacıyla, nükleer santrallerinde toryum takviyeli bir yakıt çevrimini kullanabilmek için çalışıyor. Ancak böyle bir yakıt çevrimi şimdilik, ekonomik açıdan pek anlamlı görünmüyor. Çünkü, yeni nükleer santrallerin yapımı dünya genelinde yavaşlamış ve dünya uranyum rezervleri üzerindeki baskı hafifleyince de, bu metalin fiyatı fazla artmamış. Dolayısıyla halen, toryumu doğurgan malzeme olarak yakıt takviyesi için dolaylı bir şekilde kullanmak yerine, uranyumu doğrudan yakıt olarak kullanmak daha ekonomik...

Kaldı ki, doğal uranyumun hemen tamamını oluşturan ve zenginleştirilmiş uranyum yakıtta da zaten bolca bulunan U-238 izotopu, bir başka doğurgan çekirdek. Bu çekirdek de keza, bir nötron yutup iki beta bozunumundan geçtikten sonra, parçalanabilir bir çekirdek olan Pu-239’a dönüşüyor:

$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$, $_{92}U^{239} \rightarrow {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}\beta^{0}$, $_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}\beta^{0}$

Dolayısıyla, kalpte doğurgan malzeme olarak U-238 zaten varken, onun yerine toryum yerleştirmeye çalışmak, sırf enerji eldesi açısından pek bir anlam taşımıyor.



Seyreltilmiş uranyum eldesi için geliştirilen bir düzenek.

Ancak, kolay bir üretim yolunun bulunması halinde, U-233'ün yakıt olarak kullanılmasının, U-235 ya da Pu-239'a göre, diğer bazı avantajları var. Örneğin, dünyadaki nükleer santrallerin yayılmasından duyulan kaygıların en büyüklerinden birisi, bu santrallerde ister istemez üreyen Pu-239'un çalınarak, bomba malzemesi olarak kullanılması endişesi. Pu-239 doğal bozunumu sırasında, beta parçacıkları yayıyor. Bunlar da yüklü parçacıklar olduklarından, herhangi bir malzemede fazla mesafe kat edemeyip kolayca durduruluyor. Buysa, Pu-239'un yakıt işleme tesislerinden çalınmasını, taşınıp çeşitli amaçlarla kullanılmasını kolaylaştırıyor. Halbuki U-233 doğal bozunması sırasında, yüksek enerjili ve hayli delici gama ışınları yayınlıyor. Bu da, çalınıp üzerinde çalışılmasını, imkânsız kılmasa da, zorlaştırıyor. Öte yandan, U-233'ün parçalanmasından kaynaklanan radyoaktif fisyon ürünleri, U-235 ya da Pu-239'dan kaynaklananların, 10 ile 10.000'de biri kadar daha kısa yarılanma ömürlerine sahip. Dolayısıyla, U-233'e dayalı bir enerji üretim sürecinin atık yakıt yönetimi, görece çok daha kolay.

U-233'ün bu çekiciliği karşısında, Carlo Rabbia adında bir fizikçi, toryum temelli ve kendi adıyla anılan bir enerji santralı tasarımı geliştirmiş. Bu tasarımda T-232, nötron yerine yüksek enerjili proton bombardımanıyla U-233'e dönüştürülüyor:

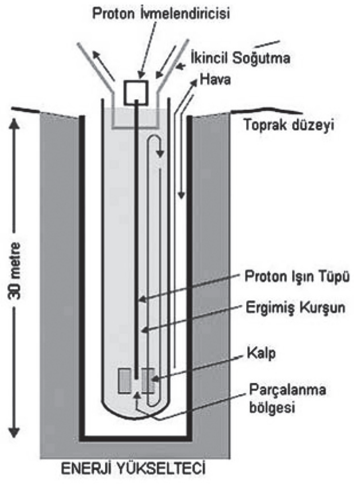
$$_{90}T^{232} + {}_{1}n^{1} \rightarrow {}_{91}Pa^{233} \rightarrow {}_{92}U^{233} + {}_{-1}\beta^{0}$$

Tabii bir de, ortaya çıkan U-233'ü fisyona uğratacak nötronlar lazım. Rabbia'nın tasarımı bunu, hiç değilse başlangıçta, kurşun gibi ağır çekirdeklerin, yine protonlarla bombardımanı sonucu parçalanarak nötron üretmesi temelinden yararlanarak başarmayı hedefliyor. Buna ‘primerleme’ deniyor ve proton ışını kesildiğinde, ortada dolaşan nötronlardan bazıları T-232 çekirdekleri tarafından yutularak bunları U-233’e dönüştürürken, diğer bazıları mevcut U-233’lere çarparak bunların fisyonuna yol açıyor. Ancak U-233 fisyonundan;

$${}_{92}U^{233} + {}_{0}n^{1} \rightarrow \text{fisyon ürünleri} + 2\,{}_{0}n^{1}$$

yalnızca iki nötron çıkıyor olmasının önemli bir sonucu var: Proton ışını kesildikten sonra, bir zincirleme reaksiyon devam edemiyor. Çünkü bunun mümkün olabilmesi için, iki nötrondan birinin bir T-232 çekirdeğini U-233’e çevirirken, diğerinin de mevcut bir U-233 çekirdeğini fisyona uğratması; yani her iki nötronun da %100 verimle kullanılabilmesi lazım. Oysa bu olanaksız. Çünkü, nötronlardan bazılarının sistemin dışına kaçması, bazılarının da fisil olmayan çekirdekler tarafından yutulması kaçınılmaz. Dolayısıyla, proton ışını kesildiğinde, fisyonlar duruyor. Ancak bu arada meydana gelmiş olan çekirdek parçalanmaları sonucu, protonların ivmelendirilmesi için harcanan enerjinin 60 katı kadar enerji elde edilmiş oluyor. Bu yüzden de Rabbia’nın tasarımına ‘enerji yükselteci’ deniyor. Hem de, tasarımda yakıt hammaddesi olarak sadece toryum kullanıldığından ve doğal toryum %100 T-232 izotopundan oluştuğundan, uranyumda olduğu gibi bir zenginleştirme işlemine gerek kalmıyor.

‘Toryum Temelli Enerji Yükselteci’nin kalbi, şekilde görüldüğü gibi; toprak düzeyinin altına yerleştirilmiş, 30 m yüksekliğinde ve 6 m yarıçapında, çelik bir silindir kap biçiminde tasarımlanıyor. İçi yaklaşık 10.000 ton kurşunla dolu olan kabın alt kısmında, yakıt hammaddesini oluşturan toryum bulunuyor. Yukarıdan aşağıya, bu toryum malzemesine doğru, bir proton ivmelendiricisi uzanıyor. Protonlar ‘parçalanma bölgesi’ne vardıklarında, bir yandan T-232’yi U-233’e çeviriyor, bir yandan da kurşun çekirdeklerini parçalayarak, U-233’ün fisyonu için gerekli nötronları üretiyor. Çoğunlukla fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi ola-



rak açığa çıkan enerji, kurşunu ısıtıp eritiyor. Isınan kurşun, çelik kap içerisinde, doğal konveksiyonla yükseliyor. Dolayısıyla, bir yandan da soğutucu görevi görüyor. Kabın kendisiyse dışından, havanın zorlamalı konveksiyonuyla soğutuluyor.

Tasarım çekici görünmekle birlikte; örneğin çelik kabın, 1200 santigrad dereceye kadar ısınan kurşunun içinde erimesi gibi; ciddi bazı mühendislik problemlerinin aşılmasını gerektiriyor. Şimdilik bilgisayar benzetişimleri ve küçük ölçekli bazı testleri yapılmış. CERN'den başka, ABD, Japonya ve Rusya'da da laboratuvar ölçeğinde çalışmalar planlanıyor. Ama sistem, çalışan bir prototip olarak henüz ortada yok. Ekonomikliği de meçhul...

NEPTÜNYUM HURAFESİ

$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$, $_{92}U^{239} \rightarrow {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}\beta^{0}$, $_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}\beta^{0}$

Adını Neptün gezegeninden alan neptünyum, aktinid serisinin sentetik transuranyum elementlerinden ilk keşfedileni. 93Np239 izotopu olarak, McMillan ve Abelson tarafından 1940 yılında, California Üniversitesi'nde (Berkeley), uranyumun, siklotron ürünü nötronlarla bombardımanı sonucu elde edildi. Şimdiyse bilinen 15 izotopu var. 2,14 milyon yıl yarılanma ömrüyle en kalıcı olan Np-237 izotopu, halen plütonyum üreten reaktörlerde yan ürün olarak, gram düzeylerinde üretiliyor. Bu izotop uranyum madenlerinde de eser miktarlarda bulunabiliyor. Çünkü doğal aktivite sonucu üretilen nötronların etkisiyle eser miktarlarda üretilebiliyor. Elementin metal hali, NpF3'ü 1200°C civarında, baryum ya da lityum buharıyla indirgenmesi sonucu elde ediliyor. Bu gümüş görünümlü metal, kimyasal açıdan reaktif. Np-237 izotopu, nötron dedektörlerinde eser miktarlarda kullanılıyor ve ORNL'den (Oak Ridge National Laboratory) gramı 280 dolardan satın alınabiliyor. Bilinen başka hiçbir kullanım alanı yok.

Dolayısıyla, kamuoyumuzda epey zamandır dolaşan ve ciddi ciddi dolaştırılan, "Türkiye'nin neptünyum rezervleri ve toplam değeri" ile ilgili tartışmalara şöyle bir nokta koymak mümkün: Türkiye'nin böyle bir rezervi yok. Çünkü dünyada doğal neptünyum rezervi diye bir şey yok!

Ağır koşullarla karşı karşıya bulunan toplumlarda 'mesih' beklentilerinin artan rağbet görmesi, sosyo-psikolojik açıdan, esefle beklenen bir olgudur. 'Mesihlerin illa da insan formunda olması gereği de, maalesef yoktur.

SEYRELTİLMİŞ URANYUM MESELESİ

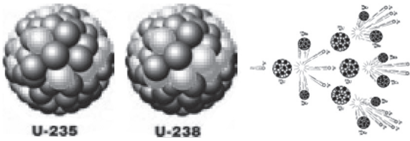
Bilindiği üzere, U-235 çekirdeği parçalanabilir, yani ‘fisil’ bir çekirdek. Görece yavaş hareket eden ‘termal’ nötronlarla bombardımana tabi tutulduğu takdirde, örneğin

$${}_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{236} \rightarrow {}_{36}Kr^{92} + {}_{56}Ba^{141} + 3\ {}_{0}n^{1}\ (+200MeV)$$

parçalanmasına uğrayarak; bir yandan zincirleme bir reaksiyonu ayakta tutabilecek sayıda, 3 adet yeni nötron salıyor ve diğer yandan, büyük bir kısmı parçalanma ürünlerinin kinetik enerjisi halinde olmak üzere, 200 MeV (milyon elektron volt) kadar enerji açığa çıkartıyor. Bu, 1 g U-235 başına, yaklaşık 2 ton kaliteli kömürünki kadar enerjiye denk geliyor.

U-235 bu özelliğiyle, nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılıyor. Ancak, doğada bulunan uranyumun sadece %0,711 kadarı bu çekirdekten. Kalan %99’dan fazlasıysa hemen tamamen, ‘fisil’ olmayan U-238 izotopundan oluşuyor. Dolayısıyla doğal uranyumun, nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilmesi için, U-235 bileşenince, %1 ila %5 düzeylerine kadar zenginleştirilmesi gerekiyor. Askerî amaçlı uygulamalardaysa, zenginleştirme oranı %99’lara kadar tırmanıyor. Tabii, bu işlem sırasında bir yandan zenginleştirilmiş uranyum elde edilirken, diğer yandan bu hedef ürünün her kilogramı başına geride, çok daha fazla miktarda ‘seyreltilmiş uranyum’ (SU) kalıyor. Bu malzeme yakın zamanlara kadar kullanılmıyor ve biriken miktarları, zenginleştirme tesisleri civarında depolanıyordu. 1991 Körfez Savaşı’nın ufukta görünmesiyle birlikte, bu malzemeye nihayet bir kullanım alanı bulundu.

Irak ordusunun mutlak hava hâkimiyetini müttefiklere terk etmek zorunda kalması; tahkimatlarını güçlendirip, savunmasında kalın zırhlı araçlara ağırlık vermesi anlamına geldi. Müttefikler de bu ihtimale karşı, savunma zırh ve duvarlarını, etkili ve ucuz şekillerde delip aşmanın yollarını aramaya başladı. Bu arayışlar sırasında, uranyumun metal haldeyken, 18,56 g/cm^3’lük özgül ağırlığıyla, kurşundan 1,7 kat daha ağır bir malzeme olması dikkatleri çekti. ABD ordusu 1990’larda bir ‘Seyreltilmiş Uranyum Projesi’ başlatmış, projenin başına da Vietnam Savaşı gazilerinden, sağlık fizikçisi bir asker olan Doug Rokke’yi getirmişti. Orduya 30 yıldan fazla hizmet vermiş olan ve kendisini “savaşçı-vatansever” olarak tanımlayan Rokke, “savaşta amaç öldürmektir” diyordu: “SU da elimizdeki en güçlü öldürme aracı...”



Zincirleme fisyon

Bu proje kapsamında, SU'dan mühimmat ve bomba üretildi. 1991 Körfez Savaşı'nda Müttefiklerin toplam olarak, 290 ila 800 ton arasında SU mühimmat kullandığı tahmin ediliyor. Bu mühimmat hedefi geçene kadar, buharlaşıp pulverize hale geliyor. Daha sonra kısa zamanda katılaşarak, havaya uranyum oksitin, aerosol benzeri parçacıkları halinde dağılıyor. Gerçi uranyumun ağır bir çekirdek olması nedeniyle, bu parçacıklar havada çok uzun sürelerle dolaşamıyor. Ancak patlamalar sırasında civarda bulunan personel, özel önlemlerle korunmamışlarsa, bu parçacıkları soluyarak ciğerlerine alıyor. Zamanla yere inen parçacıklar, suya toprağa sinerek, besin zincirine ve yeraltı sularına da karışabiliyor. Gerçi uranyum bir 'nadir toprak elementi' ve ağırlıkça milyonda birkaç oranında, hemen her yerde bulunuyor. Ancak, yüksek yoğunluktaki birikimlerinin halk sağlığı üzerindeki etkileri tam olarak bilinmiyor. Bilinenler şunlar:

Hemen her ağır metal gibi, uranyum da toksik etkilere sahip. Öte yandan, düşük düzeyde de olsa, doğal radyoaktivitesi var ve yarılanma ömrü 4,5 milyar yıl kadar. Solunum yoluyla alınması bu aktiviteyi, bünyenin içine yerleştirip, hasar potansiyelini artırıyor. İç organların SU'ya maruz kalması; böbrek hasarı, akciğer ve kemik kanseri, solunum hastalıkları, sinirsel-bilişsel bozukluklar, kromozom hasarı ve kusurlu doğumlara yol açabiliyor. İngiltere Atom Enerji Ajansı'nın, ICRP kriterlerine dayanarak Kuveyt üzerine yaptığı gizli bir çalışma, 50 ton SU'nun, solunması halinde izleyen birkaç on yıl içinde yarım milyondan fazla ilave kanser ölümüne yol açacağını tahmin ediyor.

Irak'ta 1991 savaşından sonra kanser oranlarının 10 misli arttığı, sakat çocuk doğumlarının 4-5 misline çıktığı iddiaları var ve bu artışlar SU kullanımına bağlanıyor. Dünya Sağlık Örgütü, bu iddiaların araştırılması gerektiğini söylüyor. SU mühimmat daha sonra, Sırbistan ve Kosova'da ki NATO bombardımanları sırasında da kullanıldı. Ardından bazı ülkelerde, askerlerin ani hastalık ve ölümleri tartışılmaya başlandı. Sonunda Avrupa Parlamentosu'nca, Ocak 2001'de, silahlarda SU kullanımını yasaklayan bir karar benimsendi. Karar bağlayıcı olmasa da, ülkeler üzerindeki baskıyı artırmak gibi bir işlevi hedefliyor.

Bu son savaşta Irak üzerinde, 1991'deki 300-800 tonluk düzeyin, 2 ila 6 katı kadar SU kullanılmış olduğu sanılıyor. Binlerce hektarlık Irak toprağı kirlenmiş olabilir. Maruz kalmış olan bölgeleri SU tehdit unsurundan arındırmak için ‘dekontaminasyon’, yani toprağın sıyrılıp radyoaktif atık olarak elden geçirilmesi gerekiyor. Buysa zor ve pahalı bir işlem. Örneğin, ABD’deki, çok daha yüksek düzeylerde radyasyon kirliliğine, çok daha uzun ve ağır şekilde maruz kalmış olmakla beraber, sadece 200 hektarlık bir askerî alanın temizlenme maliyeti 4-5 milyar doları bulmuş.

ABD, I. Körfez Savaşı’ndan sonra da, SU operasyonlarına katılmış olan tanklarını arındırma kararı almış ve Doug Rokke ile ekibini, bu işi yürütmekle görevlendirmiş. Kuveyt’teki 3 ay süren ilk işlemlerden sonra, 24 tank ABD’ye gönderiliyor ve arındırma işlemlerine burada, üç yıl kadar daha devam ediliyor.

Rokke bu ikinci savaşta görev almadı. Hatta savaşa karşı çıkanlardandı. Çünkü önceki görev sırasında, ekibindekiler ilk 72 saat içinde hastalık belirtileri göstermeye başlamış. Sonuçta hepsi hastalanmış. Rokke en yakın arkadaşının ölümünü izlemiş. Şimdi kendisi de, akciğer ve böbrek yetmezlikleri başta olmak üzere, çeşitli hastalıklarla mücadele ediyor.

ERKEN BOR BEKLENTİSİ

Borat da denilen Boron minerallerinin 1999 yılı üretimi 4,5 milyon ton kadar. Bunun 2 milyon tonu, 1,7 milyar dolar değerinde borik oksit (B2O3). Toplam üretimin %44 kadarı, başta tekstil ve izolasyon cam elyafı olmak üzere, cam sanayiinde kullanılıyor. İkinci en büyük tüketim alanı, deterjan ve sabun sanayii. Ayrıca, nükleer reaktörlerde ve nötron dedektörlerinde nötron yutucu olarak, az miktarlarda kullanımı var.

ABD ve Türkiye, üretimde başta geliyor. 1998 yılında her biri dünya arzının, B2O3 içeriği itibariyle %31’ini sağlamış. Türkiye en büyük ihracatçı. Diğerleri; ABD, Arjantin ve Şili. Japonya ve dünyanın en büyük tüketici bölgesini oluşturan Batı Avrupa, tümüyle ithalata dayalı. Diğer önemli ithalatçılar; Brezilya, Avustralya, Kanada ve Doğu Avrupa.

Türkiye, 563 milyon ton (B2O3) rezerviyle toplam dünya rezervinin %64’üne sahip. 1,8 milyon ton/yıl ham bor üretim kapasitesi var ve 2001 yılı ham bor üretimi 1,48 milyon ton. Madencilik ihracatı içinde 101 milyon dolarlık ihracat yapılmış. Son yıllarda ham bor ihracatı azalırken, katma değeri çok daha yüksek olan rafine bor ihracatında artış görülüyor. En büyük tüketici olan AB ülkeleri de zaten, bor işletmelerini birer birer kapatıyor. Bu madenin Türkiye'deki işletme ve pazarlaması, Eti Holding A.Ş.'nin tekelinde.

Dünya boron arzı açısından, gelecek 10 yıl da bir sıkıntı beklenmiyor. Batı Avrupa 2013 yılı itibariyle, sulardaki boron derişimlerini azaltmayı, bu amaçla deterjanlarda borat kullanımından uzaklaşmayı hedefliyor. ABD ise, bir enerji tasarrufu kalemi olarak, çamaşır makinelerinde daha düşük yıkama sıcaklıklarına yöneliyor. Bu da, deterjan sektöründe daha fazla boron kullanılacağı anlamına geliyor. ABD'deki bu tüketim artışının, Avrupa'daki azalışı dengelemesi mümkün. Ancak, yakıt hücreleri alanında beklenmedik hızlı gelişmelerin yer alması, bora olan toplam talebi artırabilecek...

Yakıt hücreleri, bilindiği gibi kimyasal enerjiyi, bir yakma işlemi oluşturmadan, doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlar. Tıpkı bir pil gibi. Fakat pildeki kimyasal enerji, önceden depolanmış olup, bitene kadar kullanılırken; yakıt hücresinde sürekli olarak yenilenebiliyor. Temel olarak bir yakıt pilinde, gaz yakıtlar ki bu genellikle hidrojen oluyor; anottan devamlı olarak beslenirken, oksitleyici gazlar, yani hava ya da oksijen, katottan devamlı olarak gönderiliyor. Elektrotlarda, elektrik akımı oluşturan elektro kimyasal reaksiyonlar meydana geliyor. Doğrudan enerji dönüşümü nedeniyle yüksek verime sahip olan bu aygıtların, şimdilik başta gelen sorunu, yakıtı oluşturan hidrojenin elde edilme, nakil ve depolama yöntemleri. Çünkü, -252 santigrad derece gibi çok düşük sıcaklıklarda sıvılaşan hidrojen, gaz halindeyken çok yer kapladığı gibi, patlayıcı bir gaz olması nedeniyle, taşıma ve depolama işlemleri sırasında tehlike oluşturuyor. İşte bu açıdan, bor bileşenlerinin hidrojen taşıma kapasitesi, bu elementin, geleceğin yakıt hücrelerinde yeni bir kullanım alanına kavuşabileceğine işaret ediyor.

Örneğin Millennium Cell firmasının, prototip bir araba üzerinde denenmiş olan; 'Talep Üzerine Hidrojen' sistemi, hidrojeni, su bazlı sodyum borohidrid (NaBH4) bileşeni halinde depoluyor. Yanıcı olmayan bu çözelti, bir katalizörle temasa geldiğinde hidrojen veriyor, aksi halde hidrojen üretilmiyor. Hidrojen üretiminden sonra borohidrid yakıt, bir borat çözeltisine dönüşüyor. Bu çözelti bir tankta saklanıp, tekrar borohidrid yakıta dönüştürülebiliyor. Bor, bu ve benzeri tüm diğer uygulamalarda, yakıt değil, yakıt taşıyıcı olarak görev yapıyor ve tekrar tekrar kullanılabiliyor. Aslında, elde edilen hidrojeni, yakıt hücrelerinde olduğu gibi elektriğe dönüştürmek yerine, içten patlamalı motorlarda yakarak ulaşım araçlarında kullanmak da mümkün.

Nitekim, hidrojenle çalışan arabaların prototipleri hazır ve piyasaya sürülme aşamasında. Ancak, otomobil üreticileri seri üretime geçmeden önce, bir hidrojen dağıtım ağının oluşturulmuş olmasını şart koşuyor. Otomobil yakıtı dağıtıcılarıysa, henüz yollarda bulunmayan bir araç için dağıtım ağı kurmaya yanaşmıyor. Dolayısıyla, ortada bir kilitlenmişlik var ve bu sorunun aşılması için, yakıt hücrelerinin pratikteki verimlerinin artırılarak ekonomikliklerinin kanıtlanması gerekiyor. Ancak ondan sonradır ki bor, bir yakıt değil, tekrar tekrar kullanılabilecek bir yakıt taşıyıcı olarak, yeni bir kullanım alanına kavuşmuş olacak. Bu durumda dahi, dünya bor talebinde yer alacak olan artışın düzeyini kestirmek güç: Paçaları tabii ki sıvamak, ama dereyi de görmek lazım.

TEMEL BİRİM STANDARTLARI

Geçen gece derin uykudayken, yatağın başucundaki telefon çaldı. Uyku sersemi kaldırıp ahizeyi, “buyrun” dedim. Gayet kibar bir ses, “sizin oradaki kütle birimi nedir?” diye sordu, “tarif eder misiniz?” “Bizim orası neresi” dedim, “dünya, değil mi” dedi. “Evet... Ya sizin orası: Siz uzaylı mısınız?” “Evet” dedi ses, tereddütle. Ben “tamam” dedim içimden, “densizin biri, işgüzar.” O ilave etti: “Bu yüzden kendimi tanıtamadım zaten, önceden; kuşkulanırsınız diye...” Mantıklı gelmişti. Bana biçtiği rolü oynamaya karar verdim: “Peki, uzayın neresinden?...” “Aynı galaksideyiz aslında” dedi, “Samanyolu’nda... Ama sizin bulunduğunuz spiral kolu var ya... onun tam zıttı yöndeki kolun ortasında...” “Hmmm” dedim, “demek gezegenler hep böyle ortalarda oluyor.” Bilgiçlik taslamıştım güya. O devam etti: “Hani dünyanızdan galaksinin merkezindeki karadeliğe bir doğru indirip, ona dik bir düzlem alacak olursanız, o düzleme göre aynı simetrik konumda gibiyiz...” “Peki, gezegeninizin adı ne?” diye sorduğumda, “Aydün” dedi. “Bırr” demiştim içimden, “bu herif akıllı...” “Bize yardım edecek misiniz?” dedi ses, “kütle biriminizi tarif edecek misiniz?” Kül yutmayacaktım tabii, “Benimle bağlantı kuracak teknolojiye sahipsiniz, ama kütle biriminiz yok; öyle mi?” diye sordum, azarlarcasına. “Yok yok” dedi, “vardı.” Tam, “vardı ne demek?” diyecekken ben, “vardı da kayboldu” dedi karşı taraf. “Allah Allah” dedim, “e ama bir sürüsünün olması lazım etrafta, arayın bulursunuz...” “Yok” dedi, “hepsi birden kaybolmuş. İmge algılama sisteminde görünmüyorlar. Bizimkilerin şeyi vardı, aralıkla imgeler gönderip yerlerini belli ederlerdi. Hiçbiri görünmüyor sistemde, hepsi birden kaybolmuş.” İlginçti: Bütün kütle birimlerini mimlemişler! “Buna niye gerek duydunuz, böyle bir donanıma?” diye sordum. “Çok duyarlı birimlerdi onlar, hassas imalat, üretimi kolay olmuyor, pahalı nesneler, o yüzden etiket lemistik, yongalar da ucuz...” Bu da mantıklıydı... “Hepsi aynı anda kayboldu” diye ilave etti. “Nasıl oldu ki bu iş?” diye sordum. “Konuyu araştırıyoruz, henüz anlamış değiliz” dedi. “Haaa” dedim içimden, “bunlar da bizden...” İşe bak yahu: Birileri gezegenin kütle birimlerini yürütmüş, hepsini birden! İnanmama ramak kalmıştı. Şunu da sorayım dedim: “Peki, benim dilimi konuşabiliyorsunuz da, kütle birimimizi nasıl tanımıyorsunuz?...” “Dilde bir şey yok ki” dedi, “çözmesi kolay.” “O kadar da değil” diyecektim ben, o devam etti; “sesli görüntü yayınlarınızdan...” “Vay canına” dedim içimden, “yayın kaydından dil çözümlemesi!” Olur mu olurdu; ses, görüntü ve bağlamdan... Ben dilimi yutacakken, ilave etti: “Sizin diliniz de zaten, teknik açıdan pek zengin bir dil değil...” Ayranım kabarmıştı, kızasım geldi. “Ama yine de zor oldu” dedi, “kullanım standardı çok zayıf.” Hak vermek zorundaydım, doğruya doğru. “Peki o zaman beni niye aradınız?” diye mırıldandım, güya sitem dolu, ezik ve mahcup. “Kimi arayıp sorsak, ‘kilogram işte kardeşim, kilogram!’ diye bağırıp telefonu yüzümüze kapatıyor da ondan” dedi, “tarif vermiyor. Rasgele 10 rakam çevirip duruyoruz, size denk geldi...”

İnanmıştım. “Sizin kütle birimi ne?” diye sordum, “neydi yani?” “Mantig” dedi. Pöh... “Peki, bizimki kilogram; Fransa’nın başkenti Paris’te bir örneği var, standardı bu örnek oluşturuyor, platin iridyumdan yapılma.” İlk defa sözümü kesti: “Tamam, o elementler bizde de var.” “Güzel” dedim, “yüzde on oranında iridyum karışımlı bir alaşım.” “Onu da not aldım, ama asıl önemli olan miktar: ne kadar?” Eee, miktarı nasıl söyleyecektim... Aklıma dünyanın kütlesi geldi, onu verir “bölün, bulun” derdim: “Dünyamızın kütlesini ölçebiliyor musunuz?” “Vallahi” dedi, “biliyorsunuz; bu kütleçekimi zayıf bir kuvvet, evrensel kütleçekim sabiti de ufacık bir şey; onu çok duyarlı ölçemiyoruz. Gezegeninizin kütlesini de, güneşin hareketi üzerindeki etkisine bakarak kabaca hesaplayabiliyoruz. Eğer onu kullanırsak, çok kaba saba bir standart çıkacak ortaya.” Haklıydı, bizim de gezegenlerle ilgili olarak yapabildiğimiz bundan ibaretti. Kaldı ki, güneşin etrafında dünyadan başka, sekiz tane büyük gezegen daha vardı: Hangisinin etkisi ne kadar, hesaplaması gerçekten zordu. Aklıma şey geldi, “bizde Avogadro sayısı diye bir şey var” dedim, “$6{,}02\text{x}10^{23}$, biz bu kadar herhangi bir şeye ‘1 mol’ diyoruz.” “Evet” dedi, “bizde de var. Sayı aynı değil, ama var öyle bir şey.” Olması gerekirdi zaten, çok sevinmiştim. “Karbon-12 izotopu da var değil mi, altı nötron altı protonu olan?...” “Olmaz mı?” dedi, “evrendeki en bol elementlerden birisi o, her yerde, her tarafımızda var.” “Hah” dedim; “şimdi eğer 1 mol karbon-12 izotopunu bir araya koyarsanız, 0,012kg eder bizim standardımıza göre. Bir kilogram da bunun 1000/12 katına eşit...” Heyecanla beklemeye başladım tepkisini. “Çok affedersiniz” dedi, “biz atomları teker teker ayırabiliyoruz da, bir sürüsünü bir araya koyup sayamıyoruz. Böyle bir tekniğimiz henüz yok.” Mahcup bir tonla söylemişti bunu. Halbuki asıl mahcup olması gereken bendim. “Asıl siz affedersiniz, çok özür dilerim; bunu biz de yapamıyoruz. Yapamadığımız için zaten Paris'teki standardı kullanıyoruz."

Bu iş böyle olmayacaktı. Hacmini tarif etsem daha iyi olacaktı galiba, örneğin '1 desimetreküp' diyebilirdim. "İyisi mi ben size standardın hacmini vereyim" dedim, "enini, boyunu, yüksekliğini filan." Pek hoşuna gitmemişti bu, "Bilmem ki olur mu?" dedi. "Niye olmasın?" dedim, "yolda bazı sorunlar çıkacak tabii, ama onları sırası geldikçe teker teker hallederiz. Şimdi, sizin uzunluk biriminiz neydi?" "Lentig" dedi. Haydaa... "Peki zaman biriminiz de tintig mi?" diye sorunca; "aaa, nereden bildiniz?" demez mi?... Saf biriydi, ciddi; benimle dalga geçmiyordu. "Aldırma, İngilizce biliyorum da ondan" dedim, "konuya dönelim; bizim uzunluk birimi metre..." Şimdi de metreyi tanımlamam gerekiyordu. Metre neydi? Aklım ilk anda Fransız Devrimi'ni izleyen, metrik sistemin oturtulmasına yönelik çabalar geldi. Metre standardı için önerilerden birisi... Sarkaç denklemini bilenler bilir, periyod $T=\pi(L/g)^{1/2}$ ifadesinden hareketle, 'yarım periyodu 1 saniye olan basit sarkacın uzunluğu' şeklindeydi. Ne saçma bir öneriymiş, iyi ki de reddedilmiş. Sarkaçların periyodu enleme göre, dünyanın kendi ekseni etrafında dönmesi nedeniyle değiştiğinden... Hem öyle olmasa bile, adamların gezegenindeki 'yerçekimi sabiti g' farklıydı. Bizimkini nasıl anlatacaktım ki ona...

Bu düşünceyi hemen terk ettim. Kabul gören öneri hangisiydi: Meridyen uzunluğunun dörtte birinin on milyonda biri... Kuzey kutbundan başlayıp Paris'ten geçerek ekvatora inen dörtte birin, on milyonda biri... Bu fena bir öneri değildi, Fransız Bilimler Akademisi'nin 1791 yılında kabul ettiği. Gerçi dünyanın karnı daha şişkindi, ekseni etrafındaki dönüşünden dolayı. Al top şeklinde bir jöleyi, çevir merkezinden geçen bir eksen etrafında; dışarıya doğru kaykılırdı tabii, bombelenirdi. Sırf bu gözlemden hareketle, dünyanın basık bir küre oluşundan; katı kabuğunun ne kadar ince olması gerektiğini anlamak mümkündü. Her neyse; bu basıklık için bir düzeltme yapmak gerekiyordu meridyen uzunluğunu hesaplarken. Onu da yapmışlar, fakat hatalı yapmışlar; bu yüzden ilk prototip, metre prototipi, 0,2 mm kısa olmuş. O zamanlar için hiç de fena değil!... Heyecanla sordum: "Dünyamızın yarıçapını ölçtünüz mü, ölçebiliyor musunuz?" Sordum ama, sorduğum anda da saçmaladığımın farkına vardım. "Biliyorsunuz" dedi, "gezegeniniz bir ışık kaynağı değil, güneşten ödünç alıp yansıtıyor. Doğrudan göremiyoruz onu. Yeri de; kusura bakmayın ama, oldukça sapa." Hak verdim hemen, "Aldırmayın, biz de uzak gezegenleri doğrudan gözlemleyemiyoruz."

Bunu söylerken çok kızmıştım kendime. “Aptal herif” dedim içimden, “metrenin şimdiki tanımını versene, en son standardı: Işık hızı, evrensel sabit!” Öyle ya, ışığın boşlukta bir saniyede kat ettiği yolun bilmem kaçta biri... Heyecanla, “Işık hızını ölçtünüz değil mi” diye sordum, “boşlukta!”. “Evet” dedi: “0,0326 lentig bölü tintig.” Vay canına, yine şişmiştik! 0,0326 lentig bölü tintig: Bu adamların ya uzunluk birimi çok uzun, ya da zaman birimi çok kısaydı. Ama işe devam etmek lazımdı, “Onu karıştırma şimdi” dedim, “bizde ışık hızı, saniyede 299.792.458 metre. Ben şimdi size saniyeyi tanımlarsam, tamam mı; ışığın saniyede kat ettiği yolu 299.792.458’e bölüp, metreyi bulabilirsiniz...” “Peki” dedi, “saniye nedir?...” Hah, şimdi olmuştu işte! Saniyenin evrensel tanımını verebilirdim, şimdiki tanımı öyleydi zaten, ayla günle ilgisi yok! Makineli tüfek gibi başladım: “Sizde Sezyum-133 izotopu vardır?” “Var...” “Bu izotopun temel enerji düzeyi, en alt; manyetik alana konulduğunda ikiye ayrılıyor.” “Ayrılıyor...” “İzotop bu iki enerji düzeyi arasında geçiş yaparken ışık yayıyor.” “Evet...” “Bu ışığın periyodunu alıp 9.192.631.770 ile çarparsanız bir saniye eder.” Hem de nasıl anlamıştı. “Çarpmaya gerek yok” dedi, “çünkü bu sezyumun o periyodu, zaten bizim zaman birimi!” “Tevekkeli” dedim içimden ve devam ettim: “Nasıl isterseniz... “Tamam: saniye böyle, metre de öyle...”

Uzunluk birimini halletmiştik de, şimdi Paris’e gidip kilogram standardının boyutlarını ölçmem gerekiyordu. Bunu nasıl yapacaktım? “Hah” dedim, “yahu, TÜBİTAK-MAM’da dünyanın en yetkin metroloji merkezlerinden birisi var: Onlar bilir! Arslanlarım benim, söylerler bana.” Yalnız şey vardı, bu boyutlar sıcaklık ve basınca bağlı; bunları nasıl açıklayacaktım. Sıcaklık neyse ne, temel birimdi de, basınç karmaşık: Al başına derdi. Ben bunları düşünürken o sordu: “Şimdi siz bize boyutları verecekseniz eğer, basıncı ve sıcaklığı da vermeniz lazım. Bunların birimleri ne?...” Haklıydı tabii, sıcaklıktan başlamalıydım. Tereddütle sordum, ‘sizin orada su var mı, H_20?” “Olmaz olur mu” dedi, “olmasaydı ben olur muydum?” “Aaa” dedim, “siz de mi su kullanıyorsunuz, sizdeki hayat da mı suya bağlı?” “Evet” dedi, “evrende daha iyi bir çözücü var mı ki?” “Ondan emin değilim. Ama su bizim buralarda çok kıt. Yakın gezegenlere bakıyoruz; yok var mıydı, az mıydı, aktı mıydı, bir tartışmadır gidiyor.” Mantıklı bir yanıt verdi: “Hidrojen, evrenin oluşumundaki ilk basamak, her yerde var. Oksijen desen, hafif sayılır, çok miktarda oluşmuş; hem de çok reaktif. Bu ikisi bir araya geldi miydi, mutlaka tepkimeye girip su yaparlar.” “Doğru” dedim, “harika bir molekül, bağları arasında 105 derece?...” Araya girdi: “620 dentig...” “Tamam, neyse” dedim, “boşver şimdi.” Yepyeni bir yol açılmıştı karşımda! Devam ettim: “Bakın, suyun üçlü noktası var ya; katı, sıvı ve gaz, üç halde birden bulunduğu...” “Evet” dedi, “biz de üçlü nokta diyoruz.” Tamamdı bu iş canım! Saydım: “Suyu bu halindeki sıcaklığına bizde 273,16 Kelvin deniyor, mutlak sıfırı kavramını da mutlaka biliyorsunuz, dolayısıyla sıcaklık birimi Kelvin’i buradan, bu sıcaklığın 1/273,16’sı olarak hesaplayabilirsiniz.” “Evet hesaplarız” dedi, ferahlamıştım. “Üçlü noktadaki basınç da 611,2 Paskal’a eşit, buradan basınç birimini bulabilirsiniz.” “Buluruz” dedi. Havalarda uçuyordum! “Hem de bu Paskal, Newton bölü metrekare; Newton bizim kuvvet birimimiz. Metrekareyi biliyorsunuz, buradan Newton’u da yakalayabilirsiniz?” “Evet” dedi. “1 Newton da ne biliyor musunuz: Paris’teki standarda 1 m/s^2’lik ivme kazandırmak için gereken kuvvet.” “Anladım, sorun yok” dedi. “Söz konusu alaşımın size bildireceğim boyutları, bizim standart sıcaklık ve basınç olarak nitelendirdiğimiz 295 Kelvin ve $1{,}03 \times 10^5$ Paskal için geçerli, tamam mı?” diye sordum. “Oldu” dedi, “şimdi boyutları verin...” MAM’dan kimseyi arayamazdım gecenin bu vaktinde. “Bakın” dedim, “ben bu ölçüleri size daha sonra bildireceğim, söz. Ama hemen şimdi, maalesef mümkün değil. Siz şimdilik, kilogramın bizim dünyada uzunca bir süre kullanmış olduğumuz tanımını kullanın. 0 da şu: Metreyi tanımlamıştık, onun onda birine desimetre diyoruz. 273,01 Kelvin sıcaklık ve $1{,}03 \times 10^5$ Paskal basınçta, 1 desimetreküp su alırsanız, bunun kütlesi de kilograma çok yakın.” “Ne kadar yakın?” “Hemen hemen aynı, endişeniz olmasın. Bizim Paris’teki örneğe geçmiş olmamızın nedeni biraz da, katı bir cismi standart olarak kullanmanın rahatlığıydı.” “Anlıyorum” dedi ve boyutları ne zaman alabileceğini sordu. “250 bin saniye sonra olursa iyi olur” dedim, “üç gün kadar; ben telefonumu açık tutacağım, sizde kapatmayın,” Öyle ya; bir kapatırsa, tekrar araması?...

Bunu der demez aklıma şey geldi: Adam bana “kimi arayıp sorsak yüzümüze kapatıyor” demişti! Biz ışık hızıyla haberleşiyorduk halbuki, galaksinin ta öbür tarafından, 54.400 ışık yılı: Bu kadar bekleyemezlerdi! “Bu rüya olmalı” dedim kendi kendime, gerçek olamaz!” “Olur mu canım” dedi kendim. Sonra zaman birimleri niye o kadar kısaydı ki günleri? Gezegenlerinin yakınında bir karadelik olmalı, güneşleri etrafında fırıl fırıl dönüyor... Ama o merkezcil ivmeye dayanamazlardı, olmazdı öyle saçma şey! “İstersen gözlerini aç! Bak tavanı bulacaksın karşında” dedim... Gözlerimi açtım, tavan karşımdaydı: Ama ne rüya!...

Başımı çevirip telefona baktım. Bip bip bipliyordu. Akşam yatmadan önceki görüşmemden sonra, ahizeyi yerine tam olarak oturtamamışım. Sonradan sesini yükseltmiş, "beni kapat" diye bağırıyordu. "Vay canına" dedim, "yahu; şu insan beyni çok acayip bir şey! Uykuda bu ses dikkatini çekmiş, neler neler uydurmuş!" Ahizeyi yerine oturttum. Kablosu gövdenin etrafına dolanmıştı. Muzip bir tebessümle bana bakıyor gibiydi. "İyi numara çektin bize ha" dedim, "hadi..." Ferahlamıştım. Gözlerimi tavanda gezdirirken "iyi ki" diyordum, "bizim temel birimlerimiz kontrol altında, hepsi de öyle iyi tanımlı..." Temel birimleri hızla aklımdan geçirdim: "metre, kilogram, saniye, amper, kelvin, mol, mum." Önemli bunlar, çünkü tüm diğerleri bunlar cinsinden tanımlı. Ama şu vardı, aklıma takıldı... Bunlar, hepsi bizim uydurduğumuz birimler; insan merkezli... Acaba doğanın kendi birimleri var mıydı? Olmalıydı tabii, de nelerdi onlar?... Bu paraya bu kadar, devamı gelecek aya...

DOĞAL BİRİMLER

Ölçmek nedir ölçmek? Bir masanın boyu, bilmiyoruz, x diyelim; nedir x'in birimi?... Belli değil. Yok ki... Öyle ya, masanın boyu orada duruyor, biz olsak da olmasak da; nereden haberi olacak bizim birimlerimizden, metreden filan: Ta ki belli bir birimle ölçmeye karar verene kadar. Diyelim metre birimini kullanmaya karar verdik, metreyle ölçmeye: O zaman "x metre" diyoruz uzunluğuna, "x metre olsun, da nedir bakalım..." Sonra ne yapıyoruz: Bir metre çubuğu alıp masanın boyunu tarıyoruz, içinde bizim metremizden kaç tane var ona bakıyoruz. Yani bir oran alıyoruz, (x m)/(l m)=x, diyelim 2; bu 2 ne? Tane: Birimsiz. Oran olduğu için birimsiz. Vay canına; demek bütün ölçümler birimsiz, oranlardan ibaret. Kıyaslama yapıyoruz çünkü, yalnızca kıyaslama; William Shockley'in dediği gibi: "Ölçmek, kıyaslamaktır."

O zaman, bir değişkenin farklı değerlerini birbiriyle kıyaslayabilir, oranlarını alabiliriz; de ölçümlerin kendilerinin ne anlamı oluyor, mutlak? Doğanın kendi birimleri olsaydı, ölçümler bu birimlerle yapılsaydı; o zaman olurdu. Halbuki bizim kullandığımız birimler dünya kökenli, dünyadaki yaşamdan kaynaklanıyor; medeniyetimizin ürünü. Yaşam demek gözlem demek, gözlem de yaşam. Bilim bunların tesbiti, yenilerinin tasarımı, icrası, aralarındaki bağlantıların inşası; teknik de, kullanımı. O yüzden Bilim ve Teknik: yaşasın! Neyse... Örneğin metre, meridyen boyunun kırk milyonda biri. Saniye günün kesri, kilogram bir desimetreküp suyun kütlesi filan. Gerçi metreyle saniyenin modern tanımı farklı; ışık hızı, sezyum saati; ama köken öyle. Bunlar fani, insan yapımı: Doğanın kendi birimleri var mı acaba, kendi iç işleyişinde kullandığı?... Örneğin kütle için?... Bir sürü parçacık var, atom veya molekül: hangisinin kütlesini birim sayacaksın? Temel parçacıklar, keza bir sürü: hangisininki daha temel?... Zaman?... Evrende bir sürü salıngaç var; atom saatleri, farklı atomların; çekirdek saatleri, farklı çekirdeklerin; gezegenlerin, yıldızların filan: Hangisinin periyodu temel? Uzunluk için: dünyanın yarıçapı, güneşe uzaklığı?... Gerçi bu ikincisi gökbilimde kullanılıyor, kaba bir birim olarak; ama duyarlı değil, yıl boyunca değişiyor. Diğeri de öyle, nerede ölçüldüğüne bağlı. Hem; dünyanın evrene ölçü biçmek gibi bir yetkisi mi var, evren ona böyle ayrıcalıklı bir konumu niye tanımış olsun ki? Onu biz yapıyoruz, üzerinde yaşadığımız için; o bizim teknemiz de ondan. 'Antropik' ilke, insan merkezli... Başka şeylere bakmak lazım. Bohr atomunun yarıçapı örneğin: Ama başka bir sürü uzunluk daha var, atom yarıçapları; hangisini temel olarak alacaksın? Gerçi sicim kuramında bir λ_s var, sicim uzunluğu, onun temel gibi durduğu düşünülüyor... Ama bunu kuramsal fizikçi bir arkadaşa sormak lazım. Anlaşılan; görünürde doğanın, bizim algıladığımız boyutlar için birim olarak sunduğu bir şey yok gibi, doğrudan önerdiği... O yüzden zaten dolaylı olarak tanımlamışız metreyi, sonunda ışık hızı cinsinden. Hah! Evrensel sabitler: Doğa belki bizim temel saydığımız birimler için, doğrudan standartlar vermiyor; ama karmaşık birimler kanalıyla önerilerde bulunuyor. Örneğin ışık hızı, evrensel bir sabit: m/s, 'uzunluk bölü zaman' birimi?... Öyle ya; uzunluk, kütle ve zaman için doğal birimler yoksa eğer; L, M, T için doğrudan verilen; belki bunların kombinasyonları için vardır, evrensel sabitler aracılığıyla verilen... O zaman bu karmaşık birimlerin doğal değerlerinden, L, M, T için de doğal birimler bulunabilir. Doğanın dolaylı olarak önerdiği temel birimlerimiz olur bunlar. Güzel! Başka hangi evrensel sabitler var, ışık hızından başka?...

Planck sabiti ħ, evrensel kütleçekim sabiti G, Boltzmann sabiti k ve boşluğun elektrik geçirgenliği $1/4\pi\varepsilon_0$. Bunlar, bizim uydurduğumuz uluslararası standart (SI) birimleriyle belli değerlere sahip, yandaki tablodaki. Mantık şu: Doğanın kendi birimleri olsaydı eğer, evrensel sabitlerin bu birimler cinsinden değeri, en doğal sayı olan 1'e eşit olurdu. Şimdi soru şu: Bu evrensel sabitleri 1 yapacak olan birimler nelerdir?...

Evrensel Sabit	**Simge**	**SI Birimi**	**SI Büyüklüğü**
Işık hızı	c	$m.s^{-1}$	3×10^{8}
Planck sabiti	$\hbar = h/2\pi$	$kg.m^{2}.s^{-1}$ (J.s)	1.05×10^{-34}
Kütleçekim sabiti	G	$m^{3}.kg^{-1}.s^{-2}$	6.67×10^{-11}
Boltzmann sabiti	k	$kg.m^{2}.s^{-2}.K^{-1}$ (J/K)	1.38×10^{-23}
Boşluğun elektrik geçirgenliği	$1/4\pi\varepsilon_0$	$kg.m^{3}.s^{-2}.C^{-2}$	8.99×10^{9}

Planck	**İfade**	**MKS Büyüklüğü**
Uzunluğu, L_p	$(\hbar G/c^3)^{1/2}$	1.61624×10^{-35} m
Kütlesi, M_p	$(\hbar c/G)^{1/2}$	2.17645×10^{-8} kg
Zamanı, T_p	$(\hbar G/c^5)^{1/2}$	5.39121×10^{-44} s
Sıcaklığı, Θ_p	$(\hbar c^5/k^2 G)^{1/2}$	1.41679×10^{32} K
Yükü, Q_p	$4\pi\varepsilon_0 \hbar c$	$1.8755459 \times 10^{-18}$ C

Dikkat edilecek olursa, $1/4\pi\varepsilon_0$ için kullanılan birimler arasında coulomb var. Diyelim temel birim olarak, amper yerine o kullanılıyor. Bu durumda temel birimler; metre, kilogram, saniye, coulomb ve kelvin. Doğanın uzunluk birimi $L=x_1$ m, kütle birimi $M=x_2$ kg, zaman birimi $T=x_3$ s, sıcaklık birimi $\Theta=x_4$ K, yük birimi $Q=x_5$ C olsun. Problem; $x_1=L/m$, $x_2=M/kg$, $x_3=T/s$, $x_4=\Theta/K$, $x_5=Q/C$ oranlarının bulunmasına indirgenmiş oluyor. Evrensel sabitler bu yeni birimler cinsinden yazılınca, herbirinin l'e eşit olması lazım. Yani; burası önemli; evrensel sabit simgelerini, birimlerinden koparıp, sadece SI büyüklüklerini temsil ediyormuşlar gibi kullanırsak; x_i'leri bulmak kolay, kutuda olduğu gibi.

Tüm diğer birimlerin doğal karşılıkları, bu birimlerden türetilebilirler; kuvvet, enerji, güç, gerilim, direnç, manyetik akı, vs. Fizik denklemleri bu birimler cinsinden yazıldıklarında basitleşirler. Çevrim faktörleri ortadan kalkar, aşağıdaki tabloda olduğu gibi. Fakat, π hâlâ ortada. Bu ilginç bir sayı, boyutsuz ve evrensel. Tevekkeli bazı matematikçiler tarafından milyonuncu basamağına kadar hesaplanıyor...

$c\,(m.s^{-1}) = 1\,(L.T^{-1}) \rightarrow c = (L/m).(T/s)^{-1} \rightarrow c = x_1.x_3^{-1} \rightarrow (1)$

$\hbar\,(kg.m^2.s^{-1}) = 1\,(M.L^2.T^{-1}) \rightarrow \hbar = (M/kg).(L/m).(T/s)^{-1} \rightarrow \hbar = x_2.x_1^{2}.x_3^{-1} \rightarrow (2)$

$G\,(m^3.kg^{-1}.s^{-2}) = 1\,(L^3.M^{-1}.T^{-2}) \rightarrow G = (L/m)^3.(M/kg)^{-1}.(T/s)^{-2} \rightarrow G = x_1^{3}.x_2^{-1}.x_3^{-2} \rightarrow (3)$

$k\,(kg.m^2.s^{-2}.K^{-1}) = 1\,(M.L^2.T^{-2}.\Theta^{-1}) \rightarrow k= (M/kg).(L/m)^2.(T/s)^{-2}.(\Theta/K)^{-1} \rightarrow k = x_2.x_1^{2}.x_3^{-2}.x_4^{-1} \rightarrow (4)$

$1/4\pi\varepsilon_0(kg.m^3.s^{-2}.C^{-2})=1\,(M.L^3.T^{-2}.Q^{-2}) \rightarrow 1/4\pi\varepsilon_0=(M/kg).(L/m)^3.(T/s)^{-2}.(Q/C)^{-2} \rightarrow 1/4\pi\varepsilon_0=x_2.x_1^{3}.x_3^{-2}.x_5^{-2} \rightarrow (5)$

veya: **(1)** $c.x_3=x_1$, **(2)** $\hbar.x_3=x_2.x_1^{2}$, **(3)** $G.x_2.x_3^{2}=x_1^{3}$, **(4)** $k.x_3^{2}.x_4=x_2.x_1^{2}$, **(5)** $1/4\pi\varepsilon_0\, x_3^{2}.x_5^{2}=x_2.x_1^{3}$.

(1)'den $x_3=x_1/c$'yi çözer, (2)/(1)'den de $x_2=\hbar/(cx_1)$ elde ederiz. Bunları (3)'e yerleştirmek, $x_1=(\hbar G/c^3)^{1/2}$ verir. Geri dönüp, bir önceki ifadeden $x_2=(\hbar c/G)^{1/2}$, ilkinden de, $x_3=(\hbar G/c^5)^{1/2}$ bulunur. Bu sonuçların (4)'e yerleştirilmesi $x_4= (\hbar c^5/k^2G)^{1/2}$, (5)'e yerleştirilmesi $x_5=4\pi\varepsilon_0\hbar c$ verir. Yani: $L=(\hbar G/c^3)^{1/2}$ m, $M=(\hbar c/G)^{1/2}$ kg, $T=(\hbar G/c^5)^{1/2}$ s, $\Theta=(\hbar c^5/k^2 G)^{1/2}$ K, $Q= 4\pi\varepsilon_0\hbar c$ C.

İlişki	**MKS Birimleriyle**	**Planck Birimleriyle**
Kütleçekimi yasası	$F=Gm_1m_2/r^2$	$F=m_1m_2/r^2$
Coulomb yasası	$F=q_1q_2/4\pi\varepsilon_0r^2$	$F=q_1q_2/r^2$
Enerji-frekans	$E=\hbar\omega$	$E=\omega$
Enerji-kütle	$E=m.c^2$	$E=m$
Enerji-momentum	$E^2=(m.c^2)^2+(p.c)^2$	$E^2=m^2+p^2$
Enerji-sıcaklık	$E=(1/2)kT$	$E=T/2$
Maxwell yasaları	$\nabla.E=(1/\varepsilon_0)\rho$	$\nabla.E=4\pi\rho$
	$\nabla.B=0$	$\nabla.B=0$
	$\nabla xE=\partial B/\partial t$	$\nabla xE=\partial B/\partial t$
	$\nabla xB=\mu_0J+\mu_0\varepsilon_0\partial E/\partial t$	$\nabla xB=4\pi J+\partial E/\partial t$

Max Planck 1897-1899 yılları arasında, Prusya Bilimler Akademisi'ne, birbirini izleyen beş rapor sundu. Hepsinin de başlığı aynıydı: *Işımanın Tersinmez Süreci Hakkında* (*Über irreversible Strahlungsworgänge*). Siyah cisim ışımasında, enerji yoğunluğunun frekansa bağlı dağılımının formülünü bulmuştu. Kendi adıyla anılan h sabitinin Boltzman sabitine oranıyla karşılaşınca da, ilk iş olarak; h, G, c ve k'dan hareketle; uzunluk, zaman, kütle ve sıcaklığın 'doğal birimlerini hesaplamış olsa gerek. Raporlarının içeriğini ve Münih'te yaptığı bir konuşmanın özetini, 1900 yılında bir makale olarak yayınladı. Şöyle diyor orada:[1] "Bunların anlamı; tüm zamanlar, dünya ve insanlık dışı da dahil olmak üzere tüm medeniyetler için önem taşıyor; dolayısıyla 'doğal birimler' olarak adlandırılabilirler." Büyük insan doğrusu. O kadar önemsemiş ki bu konuyu, siyah cisim ışımasıyla ilgili makalesinin bir eki olarak yayınlamış, 1900 yılındaki. Biraz yakından bakalım şu 'doğal' birimlere, akıl cimnastiği yapalım, SI birimleriyle kıyaslayarak...

Planck uzunluğu çok küçük, kütlesi ise çok büyük: Protonun kütlesinin ($1{,}67\text{x}10^{-27}$ kg) $1{,}3\text{x}10^{19}$ katı, dev bir kütle. Planck zamanı çok kısa, sıcaklığı çok büyük. Yükü ise, elektron veya protonun yükünden büyük; 11 katı kadar. İlginç: niye büyük?... İki protonu, birbirlerinden r uzaklığına koyup, aralarındaki elektrostatik ve kütleçekimi kuvvetlerinin oranına bakarsak; $F_E/F_G=(e^2/4\pi\varepsilon_0r^2)/(Gm_p^2/r^2)=(e^2/4\pi\varepsilon_0)/Gm_p^2=(1{,}6\text{x}10^{-19})^2.(8{,}99\text{x}10^9)/6{,}67\text{x}10^{-11}/1{,}67\text{x}10^{-27})^2=1{,}24\text{x}10^{36}$ çıkıyor. Çok büyük bir oran. İki elektron için daha bile büyük, bu F_E/F_G oranı; $4{,}18\text{x}10^{42}$ oluyor. Elektromanyetik kuvvet, kütleçekimine oranla niye bu kadar büyük? Halbuki, Planck kütlesine ve yüküne sahip iki parçacık için bu oran, $(Q_p^2/4\pi\varepsilon_0)/GM_p^2$; hesaplarsak, 1 oluyor. Yani Planck kütlesiyle yükü, elektromanyetik ve kütleçekim kuvvetlerini eşitleyen büyüklüklere sahip. Bunda şaşılacak birşey yok aslında; Planck kütlesiyle yükünü bulurken, hem G'yi hem de $1/4\pi\varepsilon_0$'ı 1'e eşitlemiştik çünkü... Fakat o zaman, "kütleçekim kuvveti elektromanyetik kuvvete oranla niye bu kadar zayıf" sorusunun yerine, "protonun kütlesi yüküne oranla niye bu kadar küçük" diye sormak lazım. Frank Wilczek'in dediği gibi.[2]

---

[1] Okun, L. B.,1 *Cube of Hypercube of Natural Units*, arXiv: hep-ph/0112339 vl 27 Dec 2001.

Başka ne var? Planck yüküne ve kütlesine sahip bulunan, fakat yüklerinin işareti zıt olan iki parçacığın, birbirlerine Planck uzunluğu kadar yaklaştırılmaları halinde, bu iki parçacıklı sistemin elektrostatik potansiyel, yani bağlanma enerjisi ne olurdu: $Q_p^2/(4\pi\varepsilon_0 L_P)=(1{,}876\text{x}10^{-18})^2.(8{,}99\text{x}10^9)/(1{,}616\text{x}10^{-35})=1{,}96\text{x}10^9$ J. İlginç: Bu da $k\Theta_p$'ye eşit. Yani Planck sıcaklığındaki ortalama kinetik enerji düzeyine... Böyle bir 'Planck atomu' olabilseydi eğer, hidrojene benzer; Planck sıcaklığında iyonlaşırdı ancak... Ama bu saçma görünüyor.

Bildiğimiz temel parçacıkları birbirine bu kadar yaklaştırmak mümkün değil. Parçacık boyutları Planck uzunluğundan çok daha büyük çünkü, kuarklarınki bile 10^{-18} metre... Neyse şimdi bunu bırakalım da, elimizdeki şu 5 sabite bir bakalım. Yakından... Hangileri gerçekten evrensel?...

---

[2] Wilczek, F., *Physics Today,* cilt 54, sayı 6, s. 12, Haziran 2001.

KARIŞIK BİRİMLER

Neydi standart temel birimler; metre, kilogram, saniye; yani MKS; kelvin, amper, mol ve mum; yani KAMM?... Bir de radyan ve steradyan var, açı ve katı açı birimleri. Bunlar boyutsuz tabii. İlginç: Boyutlu olan her değişkenin birimi var, doğal olarak; fakat temel birimlerden bazılarının boyutu yok, tuhaf olarak. Molün de yok. Sayı çünkü, $6{,}02x10^{23}$ tane; tane boyut olmaz. 12 gram karbon-12 izotopunun içerdiği sayıda temel yapıtaşı içeren madde miktarı; atom, ya da molekül. Büyük sayı ama, Allah için! Gerçi biz hep, atom ya da molekülleri molle ölçeriz, ama başka şeylerin de molü olabilir. Örneğin koyunların: 1 mol koyun, öfff! Dünya kadar koyun, öyle mi acaba? Koyuna... Beli 50 cm diyelim, ince belli, yarım metre; boyu da 1 m olsun, silindir şeklinde; hacmi 1/2 m^3 olur. Bir de ayakları var: de 1 m^3. Dünyanın yarıçapı, ekvatorda 6378 km, ortalama 6371 km. Neredeyse küre: hacmi $(4/3)\pi R_d{}^3=1{,}08x10^{21}$ m^3. Bir o kadar koyun, böl bunu Avogadro sayısına: 0.0018 mol. Bu kadar molekül; suyun molü 18 gram; 18x0,0018=0,0323 gram suda var, damlacık; bile değil, zerrecik. Bu kadar mol koyun dünyayı dolduruyor, dünya kadar koyun bu kadar mol oluyor. Aralarındaki kütleçekimi sayesinde bir arada dururlardı da. Dev bir koyun salkımı, güneşin etrafında dönüyor: Me..ee! Güneş sistemi inlerdi melemelerinden: Amma saçma oldu ha; ses boşlukta yayılmaz ki, madde ortamı lazım. Boşlukta yaşayamazlardı zaten; bunlara ot lazım, arazi lazım; oksijen, su... Ona gelene kadar, kütleçekimiyle birbirini ezip magmaya dönerlerdi. Ne kadar zamanda? Diyelim başta, canlı canlı dağıttık, dünyanın hacmine... Ya da, kütleçekimiyle birbirlerini ezmesinler diye onları dünyanın yörüngesi boyunca sıraya dizsek? Homojen olarak, halka şeklinde. Öyle ki herhangi birisi diğerlerini çekip de bir koyun gezegeninin oluşmasına yol açamasın... Dünyanın yörünge yarıçapı 150 milyon km, yörünge çeperi $2\pi R_y$=942 milyon km. Metre başına bir koyundan, $9{,}42x10^{11}$ koyun eder: tek sıra. Ya $1{,}08x10^{21}$ tanesi? Vay canına, yan yana milyarlık sıralar halinde dizmek lazım. Her birine yarım metrelik yer ayırsak, 500 bin km eninde bir şerit olurdu yörünge boyunca. Asteroid kuşağı gibi, koyun kuşağı. Eh, 150 milyon km içinde devede kulak. Saçmalama, neyse! Ama bunlar koyun yerine öküz olsalardı;

sayısı daha az; dünyanın kabuğu boynuzlardan oluşur, dış kabuğu; dünya işte o zaman öküzün boynuzları üstünde dururdu herhalde. Nereden esti bunlar?... Kurban Bayramı, yakında, ondan herhalde. Ama!... Saçma da görünse, olsun: 'Peçete üstü, zarf arkası hesapları' deniyor bunlara. Ara sıra yapmak lazım, nicelikler hakkında kabaca fikir edinmek için...

Diğer bütün birimler bunlardan türetiliyor, temel birimlerden. Hız örneğin, konumun zamana göre türevi, yol bölü zaman yani: Birimi m/s. İvmeninki; hızın hızı, zaman göre türevi, hız bölü zaman: m/s^2. Birimler bunlar. Ya kuvvet? Kütle çarpı ivmeden, F=m.a: kg.m/s^2. Buna newton deniyor. Enerji? E, kuvvet çarpı yol; daha doğrusu kuvvet çarpı yolun kuvvete paralel bileşeni iş olduğuna göre, iş yaparken de enerji harcadığımıza göre: kg.m^2/s^2. Buna joule de deniyor. Şimdi: İşin tanımını bilip de, enerjinin biriminde hata yapmak mümkün mü? Değil. İşin ilginç yanı; yani kuvvet çarpı yolun değil, meselenin ilginç yanı; enerji nasıl üretiliyor olursa olsun, birimi aynı. İster bir masayı itekleyerek sürükle, ister bir direnç üzerinden akım geçir, istersen de su dolu bir kabın altında ateş yakıp suyu ısıt: Hepsinin birimi aynı ve joule... Bu da; farklı tür enerjilerin mikroskopik ölçekteki belirti biçimlerinin hep aynı olduğuna işaret ediyor... Haa; şeyi tanımlamadık, amperi; akım birimi, o neydi? Paralel iki telden akım geçirdiğimizde; akımlar aynı yöndeyse, teller biribirini iter; ters yöndeyse çeker. Buna dayalı, amperin tanımı: Kesit alanı ihmal edilebilecek kadar küçük olan sonsuz uzunluktaki paralel iki iletkenin, boşlukta iken her ikisinden de geçirilmesi halinde teller arasında metre uzunluk başına $2x10^{-7}$ newton'luk itme veya çekme kuvvetine yol açan akım. Pek kullanışlı görünmüyor; kesitler sıfıra yakın, uzunluk sonsuz. Ama bir laboratuvarda, bu ideal tanıma istendiği kadar yaklaşılabilir. İletkenleri, gerekiyorsa daha da inceltip, daha da uzatarak. Zaten şey; mükemmel bir ölçüm istemiyoruz ki, diğer birimlerin de 'ölçüm duyarlılığı' sınırlı. Şimdi bazı birimleri, diyelim milyarda bir duyarlılıkla belirlemişken; örneğin saniyeyi sezyum saatiyle veya metreyi ışık hızı aracılığıyla; bir diğerini trilyonda bir duyarlılıkla belirlemeye çalışmak anlamsız. Gereksiz yani, birlikte kullanılacak bu birimler çünkü, eşdeğer duyarlılıkta olmaları lazım. Neyse, Amper bu: Amperi bilince yük? Elektrik yükü birimi? Coulomb... Amper neydi, saniyede geçen yük miktarı: coulomb bölü saniye. O halde; bu tellerden birinin kesitine bakarsın, saniyede geçen yük miktarı coulomb oluyor. Yükleri elektronlar taşıyor, onları nasıl sayacaksın? Elektroliz yaparsın canım, çıkan gazın hacmine bakarsın, molekül sayısına. Ya da başka bir ‘elektrokimyasal’ tepkime... $6,25x10^{18}$ tane elektron eder... Molden az. Bir elektronun yükü de $1,60x10^{19}$ coulomb oluyor demek ki, çok küçük... E peki, madem amper=coulomb/saniye; niye coulombu temel birim yapmamışlar? Onu temel birim sayıp da, amperi coulomb cinsinden tanımlamamışlar... Yük saymak zor da ondan, akım ölçmek daha kolay. Önce amperi tanımlarsın kuvvet cinsinden, daha kolay ölçülür; sonra coulombu onun cinsinden... Dolayısıyla, coulomb eşittir amper çarpı saniye, temel birimler cinsinden: C=A.s.

Gelelim gerilime, birimi ne?... Gerilim, iki nokta arasındaki potansiyel enerji farkı. Yerçekimindeki yükseklik farkına benziyor. Nasıl ki bir yokuşu tırmanırken enerji harcayıp, potansiyel enerji kazanıyor; inerken de tam tersine, yuvarlanırsak eğer, potansiyel enerjimiz azalırken kinetik enerji kazanıyorsak... Yükler de, elektrik gerilimine karşı hareket ederken öyle... Bir volt öyle bir gerilim ki; üzerinden geçirilen her coulomb yük, 1 joule enerj, ya kazanıyor ya kaybediyor; yükün işaretine ve hareket yönüne bağlı olarak. Örneğin 1 voltluk bir pil, kutupları arasına bir iletken bağlanıp kısa devre yapılsa; niye, ama yapılsa ve pilin eksi kutbundan artı kutbuna 1 coulomb eşdeğeri $6,25x10^{18}$ tane elektron geçse, bu elektronlar; gerilimin bu sırada hep aynı kaldığı varsayımıyla, 1 joule kinetik enerji kazanırlar. Ya da elektron başına elektronvolt, eV; faydalı bir başka enerji birimi. Tabii; bu enerji ya telin direnci nedeniyle telin üzerinde, ya da pilin iç direnci yüzünden pilin içerisinde ısıya dönüşür, sonuç olarak ziyan olur. Kısa devre yapılan piller bu yüzden ısınır filan. Neyse! Volt ne oluyor şimdi: coulomb başına joule, joule bölü coulomb. Joule neydi: $kg.m^2/s^2$. Columb: A.s. O halde: $V=kg.m^2/A.s^3$, temel birimler cinsinden... Hmm; elektronlar niye hızlanıyorlar ki, iletken üzerinde; onları itip kakan mı var? Var tabii, elektrik alanı, birim yük başına kuvvet. Yol boyunca var; iletkenin dış yüzeyinde, elektronlar yüzeyinden akıyor. Yol burada, iletkenin uzunluğu... Peki; birim yük başına kuvvetin birimi ne, elektrik alanı E’nin?... Tamam; newton bölü coulomb da, bu ne oluyor, $kg.m/s^2.C$; gerilim cinsinden?... Şimdi; volt; birim yük başına enerji, yani kuvvet çarpı yol bölü yük olduğuna göre; volt bölü yol, kuvvet bölü yük oluyor. Yani E’nin birimi V/m. V neydi: $kg.m^2/A.s^3$. O halde, E’nin birimi, temel birimler cinsinden: $kg.m/A.s^3$. Ya direnç birimi? Ohm: Üzerinden 1 amperlik akım geçerken 1 voltluk gerilime yol açan, ya da uçları arasınaki gerilim 1 voltken üzerinden 1 amper akım geçiren direncin büyüklüğü: R-V/I’dan... Yani $\Omega= kg.m^2/A^2.s^3$, keza temel birimler cinsinden. Fena değil, işler iyi gidiyor. Böyle devam ediyor işte; endüktans, manyetik akı vs. Buraya kadar zar zor getirdik, daha fazla kafa karıştırmayalım. Daha ilginç bir şey var çünkü, ona bakalım…

Biz karmaşık iki birimi çarparken ne yapıyoruz: İçerdikleri temel birimlerin karşılıklı üslerini topluyoruz, örneğin kuvvet çarpı yolda, $(kg.m/s^2).(m)=kg.m^2/s^2$ şeklinde. Karmaşık birimlerin bazen de kuvvetini alıyoruz. Nasıl: İçerdiği temel birimlerin üslerini, bu kuvvet sayısıyla çarparak. Örneğin diyelim, kuvvetin, her ne işe yarayacaksa; ikinci kuvveti: $(kg.m/s^2)^2=(kg^2.m^2/s^4)$ oluyor. Şimdilik sadece m, kg ve s'yi içeren karmaşık birimleri düşünüp, her birini illa da bu üçünün, illa da bu sıradaki üslerinin çarpımı şeklinde yazıyor olalım. Örneğin, $kg.m/s^2$ olan kuvvet birimini $m^1.kg^1.S^{”2}$; yol birimi metreyi de $m^1.kg^{\circ}.s^{\circ}$ şeklinde, ki üsleri toplamak daha kolay olsun: $(m^1.kg^1.s^{-2}).(m^1.kg^{\circ}.s^{\circ})=m^{1+1}.kg^{1+0}.s^{-2+0})=(m^2.kg^1.s^{-2})$. Hatta; m, kg, s sembollerini oradan oraya taşıyıp durmak yerine, karmaşık birimleri sadece, barındırdıkları temel birim üslerinin keza sıralı üçlüleri şeklinde de gösterebiliriz. Yine örneğin kuvveti, $(m^1.kg^1.s^{-2})\rightarrow(1,1,-2)$ ve yolu, $(m.kg^{\circ}.s^{\circ})\rightarrow(1,0,0)$ ile… İki karmaşık birimi çarpmak, bu birimlere karşılık gelen üçlüleri toplamaktan ibaret oluyor: $(m^1.kg^1.s^{-2}).(m.kg^{\circ}.s^{\circ})=(m^2.kg^1.s^{-2})\rightarrow(1,1,-2)+(1,0,0)=(2,1,-2)$. Karmaşık bir birimin üssünü almak da, karşılık gelen üçlüyü kuvvet sayısıyla çarpmaktan: $(m^1.kg^1.s^{-2})^2=(m^2.kg^2.s^{-4})\rightarrow 2.(1,1,-2)=(2,2,-4)$…

Bu gösterimin sağladığı bir kolaylık daha var. Herhangi bir karmaşık birim, örneğin (u,v,y); (1,0,0), (0,1,0) ve (0,0,1) üçlüleri cinsinden yazılabilir: (u,v,y)=u.(1,0,0)+v.(0,l,0)+y.(0,0,l)… Yalnız, analitik türetimlerde fiziksel değişkenlerin, dolayısıyla da karmaşık veya temel birimlerin, sadece rasyonel üsleri alınıyor; tamsayı üsler veya aralarında asal p ve q tamsayılarının p/q oranı gibi üsler. Örneğin, h yüksekliğinden düşen bir cismin hızını veren $v=(2.g.h)^{1/2}$ ifadesinde, g ile h'nın birimlerinin çarpımının karekökü alınıyor; üsler 1/2 ile çarpılıyor. Bunun da küpünü al istersen: 3/2 örneğin. Dolayısıyla genel olarak, temel ya da karmaşık herhangi bir birimin, (u,v,y) gösterimindeki u,v,y değerleri rasyonel sayılardan oluşmak zorunda. Öte yandan, böyle herhangi bir rasyonel sayılar üçlüsü, bir birime karşılık geliyor: $(u,v,y)\rightarrow m^u.kg^v.s^y$ Oh iyi! Yani öyle bir durum var ki elde; (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1) üçlülerini, olası tüm rasyonel sayı üçlüleriyle eşleştirerek çarpıp topladıktan, yani tüm doğrusal kombinasyonlarını aldıktan sonra bir çuvala doldursak… Vay canına! Bir vektör uzayı yakalamış oluyoruz: Temel vektörleri (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1) üçlülerinden oluşan, rasyonel sayılar kümesi (alan) üzerine inşa edilmiş olan bir vektör uzayı!… Çünkü, bu çuvaldan herhangi iki b_1 ve b_2 elemanı çıkarsak, rasyonel sayılar kümesinden de herhangi iki r_1 ve r_2 sayısı seçip, doğrusal kombinasyon alsak, sonuçta elde edilen $r_1.b_2+r_2.b_2$, bu çuvalda mutlaka vardır...

Tabii, kendimizi m, kg, s ile sınırlamak zorunda değiliz. Elimizde 6 tane boyutlu temel birim bulunduğuna göre, 6 boyutlu bir birimler uzayı kurabiliriz: Her noktası bir birim. Yalnız, bu; vektörlerinin bileşenleri arasında irrasyonel sayılar olmadığından, reel uzay gibi sürekli bir uzay değil. Birimler uzayı: vay vay vay! Peki ne işe yarar böyle bir uzay? Boyut analizinde çok işe...

Bazen bir fiziksel olayla ilgili olarak peşinde olduğumuz değişkenin, diğer hangi değişkenlere bağlı olması gerektiğini biliriz de; ne şekilde bağlı olması gerektiğini bilmeyiz. Örneğin bir akışkanın, diyelim havanın, yani rüzgârın; yolu üzerindeki bir cisme uyguladığı 'sürükleme kuvveti' (*drag*) nelere bağlı? Bir kere rüzgârın süratine (v) bağlı olmalı. Keza; cismin rüzgâra karşı, rüzgârın hızına dik olarak sunduğu kesit alanına da (A)... Öte yandan, rüzgârın etki ettirdiği kuvvet, ne de olsa cisme çarpan hava moleküllerinin aktardığı momentumların bir sonucu olduğuna göre; havanın yoğunluğu (ρ) da önemli. Başkaca bir etken akla gelmiyor. Dolayısıyla, havanın sürükleme kuvveti F_D; ρ, A ve v'nin bir fonksiyonu olmak zorunda: $F_D=f(\rho,A,v)$. Bu f nasıl bir fonksiyon, şekli ne?... Boyut analiziyle bulabiliriz. Fonksiyon f'nin içerisinde; ρ, A ile v, ya da bunların kuvvetleri toplanıp çıkartılıyor olamaz: Eşitliğin iki tarafındaki birimler tutmaz çünkü. Olsa olsa, kuvvetleri birbirleriyle çarpılıyordun Diyelim ρ'nun kuvveti x, A'nınki y, v'ninki de z...

İlgili değişkenlerde sadece MKS birimleri geçtiğine göre, kendimizi yine bu birimlerin üç boyutlu uzayıyla sınırlayalım. Bu uzayda; ρ, A ve v'nin; sırasıyla kg/m^3, m^2 ve m/s olan birimlerine karşılık gelen vektörler, yine sırasıyla; (-3,1,0), (2,0,0) ve (1,0,-1). Bunların, sırasıyla; x, y, ve z kuvvetlerinin çarpımına karşılık gelen vektör; x.(-3,l,0)+y(2,0,0)+z.(l,0,-l) = (-3x+2y+z, x, -z) olur. Bunun, kuvvet birimi kg.m/s^2'ye karşılık gelen, (1,1,-2) vektörüne eşit olması lazım. Yani: (-3x+2y+z, x, -z)=(1,1,-2) ki bu bize; -3x+2y+z=l, x=l, z=2 denklemlerini verir. Çözümü kolay; x ve z belli zaten, y ise ilk denklemden y=(l+3x-z)/2=(l+3-2)/2=l olarak bulunur. Kısacası, x=l, y=l, z=2 olduğuna göre, formül şu: $F_D=C.\rho.A.v^2$. Aradaki C ise bir sabit. Boyut analizi onu veremiyor, onun deneylerle saptanması lazım.

Genelde böyle; bir y fiziksel değişkenini, diğer, diyelim n tane x_i değişkeni cinsinden yazarak, $y=f(x_1, x_2, ..., x_n)$ ifadesini boyut analiziyle çözmek istediğimizde; x_i'lerin üsleri, n tane bilinmeyen oluyor.

İfadede geçen boyutlu temel birimlerin sayısı m kadar, yani en fazla 6 tane de denklem var. Bu n bilinmeyenli m denklem, matris yöntemleriyle kolayca çözülüp, katsayı matrisinin köşegenleştirilmesi yoluyla; n-m tane boyutsuz parametre cinsinden yeniden yazılabilir. Hem de bu boyutsuz parametreleri, eldeki değişkenler cinsinden hesaplamak mümkün: Buckhingam-π theoremi. Akışkanlar dinamiğinde çok kullanılıyor bu. Benzetişim (simülasyon) çalışmalarında. Neyse! Birimlerle ilgili olarak mutlaka dikkat edilmesi gereken bir husus var... Birbiriyle toplanan ya da birbirinden çıkartılan ifadelerin birimlerinin aynı olması lazım: Aksi halde elmalarla armutları topluyor, ya da birbirinden çıkartıyor oluruz. Birbirine eşitlenen ifadelerin de keza, birimlerinin aynı olması gerekir: Aksi halde elmalarla armutları birbirine eşitliyor oluruz. Gelelim doğanın birimlerine...

EVRENSEL SABİTLER

Nerede kalmıştık? Planck büyüklüklerini veren boyutlu sabitlerden hangileri gerçekten evrensel? Temel yani, “daha temel diğer bazı sabitler cinsinden hesaplanamayan...”

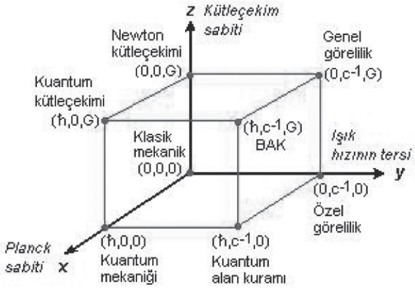
Planck	**İfade**	**MKS Büyüklüğü**
Uzunluğu, L_p	$(\hbar G/c^3)^{1/2}$	1.61624×10^{-35} m
Kütlesi, M_p	$(\hbar c/G)^{1/2}$	2.17645×10^{-8} kg
Zamanı, T_p	$(\hbar G/c^5)^{1/2}$	5.39121×10^{-44} s
Sıcaklığı, Θ_p	$(\hbar c^5/k^2 G)^{1/2}$	1.41679×10^{32} K
Yükü, Q_p[1]	$(4\pi\varepsilon_0 \hbar c)^{1/2}$	$1.8755459 \times 10^{-18}$ C

Boltzmann sabiti k... Çok sayıda parçacıktan oluşan sistemlerde, parçacıkların ortalama kinetik enerjisiyle sıcaklık arasındaki ilişki katsayısı bu. İdeal gazlar için $E=3kT/2$ örneğin. Burada asıl fiziksel değişken, kinetik enerji. Sıcaklık onun ortalama değerine göstergelik eden, yapay bir değişken. Dolayısıyla, k; biri fiziksel, diğeri yapay iki değişken arasında çevrim sabiti; ‘ayak’la metre arasındaki katsayıya benzeyen. Mikro ölçekte T diye bir şey yok aslında, örneğin tek bir atom için sıcaklık anlamsız. Öyleyse, k temel bir sabit değil. Başka? Boşluğun elektrik geçirgenliği $1/4\pi\varepsilon_0$. Fakat manyetik geçirgenliği de μ_0 ve $\varepsilon_0\mu_0=1/c^2$. Bu sabitler, elektromanyetik dalgaların boşlukta ışık hızıyla yayıldığına işaret etmekten başka, yeni bir şey söylemiyor. Nitekim, CGS sisteminde görünmüyorlar zaten... Ne kaldı geriye: c, ħ, G. Bunlar niye temel?

Işık hızı c, evrendeki ulaşılabilir en yüksek hız. Tüm başvuru sistemlerinde aynı. Kütlesiz parçacıklar boşlukta bu hızla, diğerleri daha yavaş hareket etmek zorunda. Özel görelilik kuramı, bunun sonucu. Yaptırım gücü var bu sabitin, evrenin yapısına kısıtlamalar getiriyor. O kadar ki, evrendeki tüm enerji; maddeyi de enerjiye çevir; tek bir elektronu dahi ışık hızına ulaştırmaya yetmiyor. Gerçi yüksek bir hız. Ama daha da yüksek olsa ne olurdu? Örneğin sonsuz olabilseydi, görelilik kuramı klasik mekaniğe dönüşürdü. Klasik mekanikte hız sınırı yok çünkü. Peki, sıfır olsaydı: Her şeyin hareketsiz olduğu durağan bir evren. Uzayla zaman arasındaki bağ kopardı (*decoupling*). Sıkıcı...

Planck sabiti ħ, açısal momentum değişiminin en küçük birimi, kuantumu. Bunun da evrenin görünümünde belirleyici rolü var. Örneğin hidrojen atomunun yarı-klasik modeline bakalım. Elektronun açısal momentumu, ħ'ın bir tamsayı katına eşit. Yani, yörünge yarıçapı a ise: $m_e va=n\hbar$ (I). Öte yandan bu elektron, protonun çekme kuvveti altında merkezcil ivmeleniyor: $m_e v^2/a=e^2/4\pi\varepsilon_0 a^2$ veya $m_e v^2 a=e^2/4\pi\varepsilon_0$ (II). (II)'yi (I)'e bölersek, $v=e^2/44\pi\varepsilon_0 n\hbar$. Bunu (I)'e yerleştirip, yarıçapı çözersek, $a=n\hbar/m_e v=4\pi\varepsilon_0 n^2\hbar^2/m_e e^2$. En düşük enerji düzeyi, $n=l$ için: $a_0=4\pi\varepsilon_0\hbar^2/m_e e^2$. 'Bohr yarıçapı' bu. Atomların büyüklüğü hakkında fikir veriyor. Elektronun bu yörüngedeki hızı $v_0=e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar$, bunun ışık hızına oranı da $\alpha=e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$ oluyor; 'ince yapı' sabiti. İlginç: Demek ki bu ünlü sabit, Bohr atomundaki elektronun en alt yörüngedeki hızının ışık hızına oranı... Bu durumda, ħ büyürse eğer; elektronun hızı küçülürken ve kinetik enerjisi azalırken, atomun yarıçapı büyüyor, bütün atomların: Evrenin manzarası, ölçeği değişirdi tümüyle, dışarıdan bakan birisi için; diğer unsurlar sabit kalmak kaydıyla. Ya küçülseydi, örneğin sıfıra gitse?... Açısal momentum o zaman; kesikli değerler arasında sıçrayıp durmak zorunda kalmak yerine, kesintisiz olarak değişebilirdi, klasik mekanikte olduğu gibi. Peki atoma ne olurdu? Yarıçapı sıfır: atom filan olmazdı. Beklenen bir durum. Çünkü, açısal momentumu üzerinde kesiklilik kısıtı olmayan elektron, devamlı merkezcil ivmelendiği yörüngede; ivmelenen her yük gibi, sürekli ışıyıp, çekirdeğe düşerdi: Yörüngede duramaz, atom filan olmazdı. Klasik mekanik zaten, atomun varlığını açıklamakta zorlandığından, kuantum mekaniğinin doğumu zorlanmıştı. Keza radyoetkinliğin... Yani kuantum mekaniği, $\hbar>0$ olduğu için var; $\hbar=0$ olsaydı, klasik mekaniğe dönüşürdü. Planck sabitinin şimdiki değerinden başlayıp, 0'a kadar kaydığını düşünürsek; atomlar giderek küçülür ve kuantum mekaniğinin betimlediği evren manzarası giderek farklılaşıp, sonunda klasik mekaniğin betimlediği evren resmiyle aynılaşır; onunla çakışırdı. O resimde biz olmazdık...

Öte yandan; spini tamsayı olan bozonlarla, kesirli olan fermiyonlar çok farklı davranıyor: ħ önemli. Işık hızıyla birlikte kilit konumlarda duruyor bu ikisi ve birer evrensel sabit olmakla kalmayıp; c doğadaki hızlara üst, ħ da bir diğer fizik değişkenine alt sınır koyuyor. Kütleçekimi sabiti G ise, bir nokta civarındaki enerji yoğunluğuyla, uzay-zamanın o nokta civarındaki eğrilik yarıçapı arasındaki ilişkiden kaynaklanıyor, enerji yoğunluğunun uzay-zamanda yol açtığı bükülmeden. Kütle de enerjiye eşdeğer zaten: $E=mc^2$. Yani G, geometriyle ilgili bir sabit; konumu zayıf görünüyor, ama olsun. Değeri sıfır olsaydı; kütleçekimi olmazdı, gezegenler ve galaksiler... Bu üçü, bilinen fizik kuramlarının nirengi noktalarını oluşturuyor gibi. Şöyle ki; doğada hızın üst sınırı olmasa, yani ışık hızı sonsuz olsa, özel görelilik kuramı olmazdı. Halbuki var ve gözlemleniyor. Açısal momentum kesiksiz değişebilse ve değişimlerinin bir alt sınırı olmasaydı, yani $\hbar$ sıfır olsaydı, kuantum mekaniği olmazdı. Halbuki var ve içinde yaşıyoruz. G'yi sıfır alınca; ya gezegenlerle galaksilerin oluşamadığı bir evrenle karşılaşıyor, ya da kütleçekiminin diğer kuvvetlerin yanında gözardı edilebildiği mikro-ölçeğe gidip, kuantum mekaniğinin dünyasına giriyoruz. Kısacası; bu sabitlerin değişebildiğini varsayıp, eksenleri $\hbar$, c^{-1}, G olan bir koordinat sistemi düşünürsek, Bronshtein-Zelmanov-Okun (BZO) küpü...


z *Kütleçekim sabiti*
Newton kütleçekimi (0,0,G)
Genel görelilik $(0,c^{-1},G)$
Kuantum kütleçekimi $(\hbar,0,G)$
Klasik mekanik (0,0,0)
$(\hbar,c^{-1},G)$ BAK
Işık hızının tersi y
$(0,c^{-1},0)$ Özel görelilik
Planck sabiti x
$(\hbar,0,0)$ Kuantum mekaniği
$(\hbar,c^{-1},0)$ Kuantum alan kuramı

BZO Kuramlar Küpü

Bu küpün yüzeyinde hareket ederken; $(\hbar,c^{-1},G)\to 0$ limiti bize 'klasik mekaniği', $(c^{-1},G)\to 0$ ise kuantum mekaniğini veriyor. $(\hbar,G)\to 0$ özel görelilik kuramını, $(G)\to 0$ göreli kuantum alanlarını, $(\hbar)\to 0$ genel görelilik kuramını, $(\hbar,c^{-1})\to 0$ Newton'un kütleçekimi yasasını, $(c^{-1})\to 0$ kuantum kütleçekimi kuramını... Bunların her biri; 'kütleçekiminin kuantum kura-mı'nı da içeren bir 'birleşik alanlar kuramı'nın (BAK), yani 'her şeyin kuramı'nın özel halleri. Bu sonuncusu, $(\hbar,c^{-1}G)$ üçlüsünün halen gözlemlenen değerlerine karşılık geliyor. Biz bu köşede yaşıyoruz, küpün üstteki bize bakan köşesinin tanımladığı evrende. Fakat, herkesin tatminkâr bulduğu bir BAK henüz bilinmiyor. Şimdiki en güçlü aday, üzerinde halen çalışılan sicim kuramı. Bir soru daha: Evreni betimlemek için en az kaç boyuta, dolayısıyla da en az kaç temel birime gereksinim var?...

Evren; kütle-enerjinin, uzay-zamandaki örgüsü. Dolayısıyla; uzay, zaman ve kütle için birer; yani üç temel birim lazım: MKS. Böyle diyor Lev B. Okun.[1] Peki yük birimi ne oluyor o zaman? İki yük arasındaki kuvvetin hesaplanabilmesi lazım, keza iki akım arasındaki... Hah: Elektrik kuvveti kütleçekimiymiş gibi yazılabilir: $F_E=q_1q_2/4\pi\varepsilon_0 r^2=Gm_1'm_2'/r^2$. Burada m_1' ve m_2', yüklere eşdeğer, diyelim ‘hayali’ kütleler: $m_1'=q_1/(4\pi\varepsilon_0 G)^{1/2}$, $m_2'= q_2/(4\pi\varepsilon_0 G)^{1/2}$. Yüklerin yerine, bu eşdeğer kütleler kullanılabilir, aralarındaki kuvvetin hesabı için. Yük o zaman kütlenin gölgesi gibi olur, yalnızca kütle birimi yeter... Aslında; kütle yükün gölgesi gibi, iki kuvvetin oranına bakınca; ama neyse...

---

[1] Duff, M. J., Okun, L. B., Veneziano, C, *Trialogue on the number of fundamental constants,* arXiv:physics/0110060 v3, 13 Sep 2002, 1HEP03(2002)023.

MKS’ye karşılık, sicim kuramının öncülerinden Gabriele Veneziano, evrensel sabit olarak ışık hızı c ve sicim kuramındaki sicim uzunluğu λ_s ile yetinilebileceği, dolayısıyla sadece uzunluk ve zaman boyutlarının gerektiği kanaatinde: MS. Nihayet, Michael Duff, bu ikisinin dahi gereksiz olduğunu savunuyor. Çünkü, örneğin ışık hızının; zamanla uzunluk arasında bir çevrim katsayısından ibaret olduğunu düşünüyor: $x=ct$. Boltzmann sabiti k’daki gibi... Öyle ya; uzunluğu ‘ışık yılı’yla ölçüyoruz zaten, bir de zaman birimine ne gerek var? Gerçi zamanı metreyle ölçmüyoruz ama... Evren zaten boyutsuz denklemlerle betimleniyor, eşitliklerin iki tarafı da aynı boyuta sahip olmak zorunda. Örneğin $F=m.a$ ilişkisi; sol tarafı Planck kuvvetine, sağ tarafı da Planck kütlesiyle ivmesinin çarpımına bölmek suretiyle, boyutsuz olarak yazılabilir. O halde evrenin tüm fiziksel betimlemesi, değişkenlerin boyutsuz oranlarıyla yapılabilir, kuramsal olarak böyle. Ama; kuramın doğruluğunu sınamak için ölçüp biçmek gerektiğinde, işte o zaman boyut gerekiyor. Boyut; ölçme işleminin, gözlemcinin, vazgeçilmez aracı. Evrenin boyuta ihtiyacı yok da, bizim var sanki, gözlemci olarak. Ama ölçmek de kıyaslamaktı zaten, boyutsuz oranlar almak. O zaman, evrenin yapısı açısından asıl önemli olan, boyutlulardan ziyade, boyutsuz sabitler olsa gerek; ‘boyutsuz evrensel temel sabit’ler. Veya ‘parametre’ler. Ne gibi?...

Örneğin, temel parçacıkların kütlelerinin oranları, kuarklarla leptonların: 11 tane. Sonra, ‘ince yapı sabiti’ var, α; hidrojenin enerji düzeylerinin ayrışma büyüklüğünü belirleyen. Bohr atomundaki elektronun, en alt yörüngedeki hızının ışık hızına oranıydı bu: $\alpha=e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$. Başka hünerleri de var α’nın. Proton yükünün Planck yüküne oranı, $e/Q_P=e/(4\pi\varepsilon_0\hbar\ c)^{1/2}=\alpha^{1/2}$ oluyor. İki yük arasındaki kuvvet, yüklerin çarpımıyla orantılı olduğuna göre; iki proton arasındaki kuvvetin iki Planck yükü arasındaki kuvvete oranı α’ya eşit. Bu ince yapı sabiti aynı zamanda, elektromanyetik kuvvetin diğer kuvvetlere oranla şiddetinin ölçüsünü veren ‘bağlantı sabiti’ (*coupling constant*). Dolayısıyla, bir sürü elektromanyetik olayda karşımıza çıkıyor. Fakat, henüz kimse bu sabitin, nereden geldiğini veya nasıl hesaplanabileceğini bilmiyor. Gerçi başka evrensel sabitler de var, sık karşılaştığımız. Örneğin π sayısı, ya da doğal logaritma tabanı e. Fakat bunları hesaplamak mümkün, istenen duyarlılıkla. En azından; cos(π)=-1 ve 1n(e)=1 olduğuna göre, arc-cos(-1) ile exp(1)'in seri açılımlarından. Fakat α için böyle bir formül, algoritma henüz yok; bilgisayarda hesaplamak için. Şimdilik, içerdiği değişkenlerin ölçülen değerlerinden hareketle, yaklaşık olarak hesaplanabiliyor.[2] Richard P. Feynman, bütün kuramsal fizikçileri meraklandıran bu sabitin "Tanrı'nın cezası bir gizem" olduğunu söylemiş. Ardından da, π ve e ile arasında bir ilişki olabileceği önsezisini sergilemiş: 40 yıl önce...

Nereden geldik buraya? Boyutsuz temel sabitler, ya da parametreler: Güçlü bağlantı sabiti, zayıf bağlantı sabiti, kütleçekimsel ince yapı sabiti ve diğerleri. Toplam olarak, iki düzine kadar.[3] Evreni isabetle betimleyen bir 'Birleşik Alanlar Kuramı'nın, yani 'Her şeyin Kuramı'nın bu sabitleri öngörüp, hesaplayabilmesi lazım. Halbuki mevcut kuramlar bunu yapamıyor ve sabitlerin, kuramlara dışarıdan, parametre olarak yerleştirilmesi gerekiyor. Bazı kuramlar, bu sabitlerin değişebileceği öngörüsünde. Örneğin, ince yapı sabiti α'nın, enerji ölçeğine bağlı olarak; farklı evren modellerinde veya aynı evrenin farklı evrelerinde, değişik değerler alabileceği... Bu olasılığı sınamak için yapılan gözlemlerin sonuçları çelişkili. Dolayısıyla, α'nın zamanla değişip değişmediği sorusu, bilim insanları arasında hararetle tartışılıyor. Çünkü α'nın değişmesi, evrenin 'yeniden ölçeklenmesi' demek. Niye öyle, bu ne demek?...

Örneğin, tüm boyutsuz temel sabitler aynı kalmak kaydıyla, ışık hızının ansızın yarıya, c/2'ye indiğini varsayalım. Planck uzunluğu $L_p=(\hbar G/c^3)^{1/2}$, $\sqrt{8}$ katına çıkmış ve uzaydaki, atomlar dahil her şeyin boyutu büyürken, metrelerinki de uzamıştır. Yeni metremizin uzunluğu M; eski metre cinsinden, $\sqrt{8}$m olur. Öte yandan Planck zamanı $T_p=(\hbar G/c^5)^{1/2}$, $\sqrt{32}$ ile çarpılmış ve saatler yavaşlarken, saniyeler uzamıştır. Yeni saniyemizin uzunluğu S; eski saniye cinsinden, $\sqrt{32}$s'dir. Bu yeni evrendeki ışık hızı, yani $(c/2)$ m/s $=(c/2)\,(M/\sqrt{8})/(S/\sqrt{32})=c\,(M/S)$ olur. Yani; ışık hızının yeni evrendeki, yeni birimler cinsinden sayısal değeri değişmez. Bu evren yeniden ölçeklenmiş, fakat içerdiği boyutlu sabitlerin ölçülen değerleri aynı kalmıştır. Bu evrene dışarıdan bakmakta olan Tanrı benzeri bir varlık, söz konusu değişikliğin farkına varırdı tabii. Fakat içinde yaşayanlar varamazdı. Halbuki evrensel (boyutsuz) parametreler için, durum böyle değil. Örneğin, güçlü kuvvet bağlantı sabiti %20 daha büyük olsaydı; iki proton birleşip, 'diproton'lara vücut verebilirdi. Evrende şimdiye hidrojen kalmaz; yıldızlar hidrojen yakıp, ışık ve enerji yayamazdı. Donuk bir evren, ölü... Bu durum; evrensel parametrelerin yaşamı mümkün kılacak şekilde 'ince bir ayar'a sahip olduğunu savunan 'antropik ilke'yi gündeme getiriyor. Buna karşıt görüşlerden biri; evrenimizin geniş bölgelerinde hayat bulunmadığını, dolayısıyla evrensel parametrelerin, pek öyle 'ince ayar'lı olmadığını savunuyor. Bir diğeri, farklı bir parametre kümesince betimlenen bir evrende, bizimkine benzer karbon-12 merkezli olmasa da, farklı yaşam türlerinin mümkün olabileceğini veya en azından, böyle bir evrende hayatın mümkün olmadığını kanıtlamanın olanaksızlığını vurguluyor. Öte yandan, çoklu evren kuramları, paralel birçok evrenin bulunduğuna ve bunlardan bazıları hayata uygun iken, diğer pek çoğunun olmayabileceğine işaret ediyor. Stephen Hawking, evrenimizin pek de özel olmadığı ve Büyük Patlama'yla birlikte 'yok'tan başlayarak, hayatımızı barındırabilecek şekilde gelişmesi olasılığının %98 civarında olduğu görüşünde. Ama: "Evreni betimleyen bir kuram geliştirip denklemlerini yazabilirsiniz, fakat bu denklemlere 'ateşi üfleyip,' o evreni var eden nedir?" sorusunu da soruyor. Doğa bilimci Stephan Jay Gould ise, "evrenimizde niye hayat var?" sorgulamasını; tesadüfen düşeş gelen zarların ardından, "niye böyle oldu?" diye sorulmasına benzetiyor. Steven Weinberg'in yorumu ise şöyle: "Madde ayağa kalkıp, bilinç olmuş; kendini kavramak için." Yürüyor...

---

[2] Aralık 2003 itibariyle, CODATA (Committee on Data for Science and Technology, ICSU) tarafından önerilen değeri, son iki basamaktaki hata payları parantez içinde olmak üzere; $\alpha=7.297352568(24)\mathrm{x}10^{-3=}1/137.03599911(46)$.

[3] http://hepweb.rl.ac.uk/ppuk/physFAQ/open_questions.html

Siz ne dersiniz?...

DÜNYA'YI ÖLÇMEK

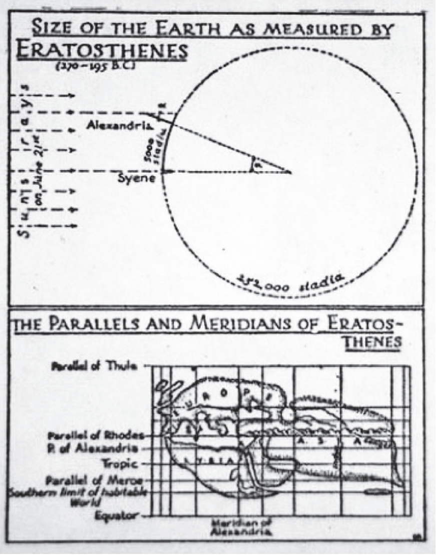
Nerede kalmıştık? “Madde ayağa kalkıp bilinç olmuş, kendini anlamak için.” Yürüyor… Nerede: Dünya'da. Nasıl bir şey şu Dünya?…

Güneş Sistemi'ndeki 9 gezegenden birisi. İçten dışa doğru, Dünya'ya benzeyen (*terrestrial*) dördünden (Merkür, Venüs, Dünya, Mars) üçüncüsü. Şekli küremsi. Bunun böyle olduğunu Pythagoras (MÖ 582-496) biliyormuş. Nasıl? Dünya'nın Ay üzerine düşürdüğü gölgenin hep daire şeklinde olduğundan hareketle. Öyle ya; örneğin düz olsaydı Dünya, yani yassı ve disk şeklinde, Ay üzerindeki gölgesi bazen daire şeklinde olurdu tabii; ama bazen de iki dairenin arakesiti, hatta düz bir çubuk şeklinde de olabilirdi. Al bir madeni parayı karşına ve çevir; kesiti kâh şöyle görünürdü, kâh da böyle… Aristoteles (MÖ 384-322) da Pythagoras'ın bu düşüncesine katılmış ki, Dünya'nın küre şeklinde olduğu kanısını aktarmış. Öte yandan, denizciler Dünya'nın küreselliğini öteden beri biliyor olmuş olsalar gerek; iyi gözlemci olan denizciler, aklını kullanan. Çünkü, gemi yola çıkıp açılıyor; ufkun ötesinde suyun altında kaybolduktan, yani sanki battıktan sonra, dönüp dolanıp, tekrar beliriyor ve hiçbir şey olmamış gibi geri geliyor. Bunun tek bir açıklaması olabilir: Dünya küresel. Buna karşın, binlerce yıl boyunca Dünya'nın yassı olduğunu iddiaya devam edenler olmuş, hâlâ da var.

Kutuplarda hafifçe basık, ekvatorda biraz şişkin. Niye böyle? Kendi etrafında dönüyor çünkü ve bir jöleyi de hep aynı yönde döndürsen, dönme eksenine dik yönde bombelenir zamanla. Demek ki Dünya kaskatı değil; en azından bir zamanlar öyle değilmiş, uzun bir süre için. Atmosferi de öyle olmalı, kutuplarda basık. O halde; kutuplardaki hava basıncı, görece düşük…. Nitekim öyle: Güney Kutbu'nun 2.900 m yüksekliğindeki basınç, yükseklik sanki 3.300-4.000 metreymiş kadar. Düşük: Kutbun kendisi bir yüksek basınç merkezinin ortasında (*Hadley Dolanımı*) bulunmasına karşın. Bu durum, kutuplarda uzun süre kalanlarda rahatsızlıklara yol açıyor. Neyse…

Yarıçapı ekvatorda 6.378,14 km, kutuplarda 21,36 km daha az. Gözle algılanamayacak kadar az farklı. Ortalama, R_D = 6.370 km kadar. Dolayısıyla, çevresi ekvatorda 40.075, kutupsal 40.008 km. Nereden biliyoruz? E, Kireneli (bugünkü Libya'da bir kent) Eratostenes (MÖ 276-194), bunu MÖ 3. yüzyılda hesaplamış. Nasıl? Söylentiye göre; İskenderiye ile arasında yürüyüp, aralarındaki mesafeyi kabaca ölçerek. Şöyle: Güneş çok uzaklarda, sanki sonsuzda olduğu için, Dünya'ya gelen ışınları paralel gibidir ve bu ışınlar yeryüzündeki herhangi bir noktaya, yıl boyunca değişik açılarla gelir. Dönme ekseni eğik olduğundan. Bu nedenle, yere dikine çakılan bir çubuğun gölgesinin uzunluğu, yıl boyunca değişir. Örneğin, Güneş tam tepedeyse (*zenit*); çubuk gölge vermez, veremez. O noktada çubuk yerine derin bir kuyu varsa eğer, o zaman da; ışınlar kuyunun duvarlarına paralel olarak iner ve kuyunun dibindeki sudan geri yansıyabilir. Syene'de (bugünkü Aswan) böyle bir kuyu varmış ve yazın en sıcak gününde, Güneş'in gökyüzünde ufuk çizgisine göre en yüksek konumuna ulaştığı (*solstis*) öğle saatinde, dibi görünürmüş. Eratostenes Syene'ye yaptığı bir gezi sırasında bu kuyuyu görünce, ünlü yöntemini tasarlamış ve İskenderiye'ye kadar yürüyüp, aradaki mesafeyi adımlayarak ölçtükten sonra, ertesi yılı beklemiş. Yazın aynı gününün öğle saati geldiğinde, bu sefer İskenderiye'de yere dik bir çubuk çakıp, gölgesinin boyunu ölçmüş. Çubuğun boyunun (h) gölge uzunluğuna (1) oranını alıp, Güneş ışınlarının yere geliş açısını hesaplamış ($\tan\alpha = l/h$). Bu aşamada yaptığı saptama şu: Dünya'ya paralel gelen Güneş ışınları, Syene'ye dik inerken, İskenderiye'ye α açısıyla ulaştığına ve bu farklılığa, Syene ile İskenderiye arasındaki enlem farkı yol açtığına göre; α açısı iki kent arasındaki yayı kapsıyor. Bu durumda, kentler arasındaki mesafeden (d), Dünya'nın çevresi $Ç=(2\pi/\alpha)$ d olarak hesaplanabilir. Bulduğu sonuç: 252.000 stadia. Spor alanlarının ölçüsü olması gereken 'stadia'nın metre karşılığı tam olarak bilinmiyor. Çünkü bu birim için o zamanlar, farklı kentlerde farklı uzunluklar kullanılmış. Aristoteles'in anlatımına göre, 185 metre kadar olması gerekiyor ki bu da, Eratostenes'in Dünya'nın çevresi için bulduğu değerin 46.620 km olduğu anlamına geliyor. Anlaşılan, Dünya'nın çeperi o dönemde, büyük bir merak ve önemli bir çalışma konusuymuş. Çağın dehalarından bir diğeri olan Arşimed (MÖ 278-212), 'Kum Tanelerinin Sayısı Üzerine' (*De Arenae Numero*) yazdığı kitapta, 300.000 'stadia' değerini veriyor. Daha da büyük bir değer. Durum, rivayetleriyle birlikte böyle...

Aslında, Eratostenes'in bu hesabı yapması için, çok büyük olasılıkla, Syene'da bir kuyu görüp, İskenderiye'ye kadar yürümesi gerekmedi. Çünkü, MÖ 236 yılında, II-I. Ptolemaios Evergetes tarafından İskenderiye Kütüphanesi'nin yöneticiliğine getirilmişti. Zamanın önde

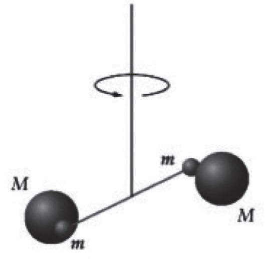

SIZE OF THE EARTH AS MEASURED BY ERATOSTHENES
(270–195 B.C.)
Sun's rays on June 21st
Alexandria
Syene
5000 stadia
252,000 stadia
THE PARALLELS AND MERIDIANS OF ERATOSTHENES
Parallel of Thule
Parallel of Rhodes
P. of Alexandria
Tropic
Parallel of Meroe
Southern limit of habitable World
Equator
Meridian of Alexandria
EUROPE
ASIA
LYBIA

gelen kentleri için, Güneş'in yılın çeşitli zamanlarındaki 'ufuk düzlemine göre yükseklik'lerinin kayıtları dahil, gereksinim duyduğu bilgilerin hepsi elinin altında vardı. Kentler arası mesafelerse, Büyük İskender'den (MÖ 356-323) sonra kayda dökülmüştü zaten. Hakkındaki rivayetler, insanlığın toplumsal bilinçaltının, önde gelen düşünürlerinin hayatlarını çarpıcı öykülerle bezeyerek, mitleştirip ölümsüz anlatımlara dönüştürme tutkusundan kaynaklanmış olsa gerek. Bir bakıma onlara şükranlarını sunma istek ve nezaketinden. Bu, Eratostenes örneğinde çok başarılı olmuş. Çünkü, birkaç kitap yazmış ve matematiğe; en çok bilineni, verilen herhangi bir tamsayıdan küçük olan tüm asal sayıların bulunmasına yönelik algoritma 'kalbur'u olmak üzere, önemli katkılarda bulunmuş. Ayrıca, yukarıdaki şekilde birinin, sonradan tahmine dayalı olarak hazırlanmış bir kopyası görülen haritalar hazırlamış. Fakat, eserlerinden geriye hiçbiri kalmamış. Hakkında bilinenler, diğer çalışmacılar tarafından kendisinden yapılan alıntılardan oluşuyor. Bir de şu: MÖ 195 yılında kör olunca, ertesi yıl, açlık yoluyla intihar etmiş. Toprağı bol olsun. Eski Grek dostlarımıza çok şeyler borçluyuz.

Eratostenes'in kullandığı yöntemin basitliği, İskenderiye ile Syene'nin aynı boylam üzerinde olduğu varsayımına dayalıydı ki bu tam doğru değil. Öte yandan, kentler arası uzaklık, deve kervanlarının bir kentten diğerine, günde ortalama 100 stadia yol kat ederek, 50 günde ulaştığı bilgisinden türetilmişti. Hayli kaba bir ölçüm. Yoksa, bugün aynı yöntemle, Dünya'nın çevresini, birkaç yüz kilometre hata ile, 40.000 km civarında olarak hesaplamak mümkün. Arzu ederseniz, deneyebilirsiniz. 22 asır sonra da olsa, Eratostenes'ten daha iyi bir ölçüm yapabilmek, hoş bir duygu olsa gerek. Hem de, Güneş ışınlarının illa da kentlerden birinde dik düşmesi gerekmiyor. Aynı çubuğun iki kentte verdiği gölgelerin çubukla yaptığı açıların farkı yeterli. Dönelim Dünyamıza...

Hacmi $(4/3)\pi R_D^3=10^{12}$ (trilyon) km^3, Dünya'nın hacmi. Kütlesi: $6x10^{24}$ kg kadar. Nereden biliyoruz? Kütle ölçmek, görece kolay. Çünkü, Newton'un kütleçekimi yasasına göre, M ve m kütleli iki cisim arasındaki çekim kuvveti $F=GMm/r^2$ ile veriliyor. Cisimlerden, M kütlelisi Dünya, diğeri de herhangi bir cisim olsun. İkinci cismin üzerinde başka kuvvet yoksa eğer; Dünya'nın uyguladığı çekme kuvvetinin, Newton'un İkinci Yasası'na göre, cismin kütlesiyle ivmesinin çarpımına eşit olması lazım: $F =ma$. Bu iki ifadenin eşitliği, $=GM/r^2$ verir ve ikinci cismin kütlesinin bu ifadede yer almaması, aynı yükseklikteki bütün cisimlerin aynı ivmeyle 'düştüğü' anlamına gelir. Buradan, $M=ar^2/G$ çözülebilir. Bu durumda, Dünya'nın kütlesini belirlemek için; herhangi bir cismi alıp, Dünya'nın merkezinden r uzaklığına kaldırdıktan sonra bırakarak, ivmesini ölçmek yeterli. Bu deney deniz seviyesinde yapılırsa, $r=R_D$ olur ki bu yarıçapı bildiğimize ve ekvatordaki deniz seviyesinde bütün cisimler, bildiğimiz $g=9,78m/s^2$ ivmesiyle düştüğüne göre; M'yi, $gR_D{}^2/G$ olarak hesaplayabiliriz. Yeter ki G'yi bilelim. Peki o nereden gelecek? Onun önceden belirlenmiş olması lazım. En basit olarak, Henry Cavendish'in (1731-1810) 1783 yılında kullandığı düzenekle... Dünya'nın çevresinin Eratostenes tarafından ölçülmesinden sonra, kütlesinin de ölçülebilmesi için, aradan iki bin yıla yakın bir zamanın geçmesi ve bu arada Newton yasalarının keşfedilmesi gerekti.

Cavendish, diyelim L uzunluğundaki bir çubuğu, iki ucuna küçük birer m kütlesi sabitledikten sonra, bir telle ortasından tavana asmış ki, çubuk gerektiğinde yatay bir daire üzerinde dönebilsin. Sonra bu hayali daire üzerine, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi; m kütlelerine yakından bakan, fakat çubuğa göre zıt taraflarda bulunan, büyük birer M kütlesi yerleştirmiş. M-m mesafelerinin (d) eşit olması halinde, m kütlelerinin her ikisi üzerinde de yatay kuvvetler ($F=GMm/d^2$) bulunacak ve bu kuvvetler; yaklaşık zıt yönlerde olduklarından birbirini sıfırlamakla beraber; çubuk üzerinde bir dönme kuvveti (tork) uygulayacaktır ($T_ç=LGMm/d^2$). Çubuk dönmeye başlar. Tel büküldükçe, bu dönmeye karşı bir tork (T_T) üretir ve dönmeyi bir süre sonra, diyelim θ açısına ulaştığında durdurur. Telin özellikleri önceden incelenmiş olup, hangi miktarda dönmeye karşı ne kadar tepki torku ürettiği bilinmektedir. Örneğin θ açısı için, $T_T=k\theta$ kadar; k burada 'dönmeye karşı yay sabiti' olup, büyüklüğü önceden belirlenmiştir. Dönme durduğunda, etki ve tepki torkları eşit hale gelmiş olup ($LGMm/d^2=k\theta$),



bu eşitliğin çözümü G'yi verir: $G=k\theta d^2/LMm$.

Ancak kütleçekimi zayıf bir kuvvet oluğundan, anlamlı ölçümlerin elde edilebilmesi için, deneyin büyük bir dikkat ve azami duyarlılıkla yapılması gerekiyordu. Cavendish'in kullandığı düzenekte; 'dönme sarkacı' (*torsional pendulum*) da denilen telin uzunluğu 1 metre, tahtadan yapılmış çubuğun uzunluğu 2 metre kadardı. Hava akımlarından etkilenmemeleri için tahta çubuk içine gömülmüş olan küçük kütleler 5'er, dışarıdaki büyükleri ise 20'şer cm çapında kurşun kürelerdi. Düzenek aslında, John Michell (1724-1793) adında bir yerbilimci tarafından tasarlanıp yapılmıştı. Michell düşündüğü deneyleri yapamadan ölünce, düzeneği Cavendish'e iletilmiş. Cavendish bu düzeneği, eskiyip yamulmuş olan tahta kısmını değiştirip, hava akımlarına karşı korumalı bir odanın içine yerleştirmiş ve hata paylarını en aza indirmek için, odanın duvarları dışındaki, silindirsel geometriyi bozabilecek tüm ağırlıkları uzaklaştırmış. Kendisini de... Ölçümlerini uzaktan teleskopla yapmış. Gerçi aynı hesaba gelir, biri diğerinden elde edilebilir, ama sonunda; deney sonuçlarından hareketle, G'yi veya Dünya'nın kütlesini değil, Dünya'nın ortalama yoğunluğunu hesaplamış. Çünkü Michell bir yerbilimciydi ve düzeneğini bu amaçla tasarlamış olsa gerekti. Cavendish bu çalışmasıyla ilgili olarak yayınladığı orijinal makalesinde *(Philosophical Transactions, 1798),* Dünya'nın yoğunluğunu, suyunkine oranla, 5,48 olarak veriyor. Aslında, onca titizlikle elde etmiş olduğu deney sonuçlarının ortalaması 5.448. "4"lerden birini gözden kaçırmış galiba. Dünya'nın ortalama yoğunluğu için bugün kabul edilen değer ise, 5.518 kg/m^3. Halbuki, yerkabuğunu oluşturan taş, toprak ve minerallerin bollukları oranında bir karışımı alınıp yoğunluğu ölçülse, 3.000 kg/m^3 civarında bir değer bulunur ki bu, yerin altında, kabuğundakinden daha yoğun bir şeylerin bulunduğu anlamına geliyor...

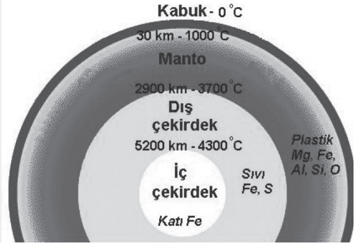
Sahi: Ne var şu bastığımız yerin altında?

DÜNYA'NIN İÇ YAPISI

Sahi: Ne var şu bastığımız yerin altında, neler?... Karpuz değil ki yarıp da bakalım, içinde ne var ne yok. Karpuz kadar olsaydı, yarmaya gerek kalmazdı gerçi. Alırdık koltuğumuzun altına, dayardık kulağımızı, bir tarafından bir fiske vurup, çıkan sesleri dinlerdik. Tok bir ses çıkar da uzunca süre tınlarsa, bu elimizdeki cismin; içi dolu ve katı, elastik bir küre olduğu anlamına gelirdi. Yok eğer ses birkaç kez yankılandıktan sonra, bu arada hızla sönümlenip kaybolursa, bu da içinin kısmen hava veya suyla dolu, ya da görece yumuşak veya plastik olduğuna işaret ederdi. Dalgaların enerjisi hızla soğurulduğuna göre... Yankılanma niye? Ses dalgaları yoğunlukları farklı olan iki ortamın birinden diğerine geçerken; tıpkı ışık dalgalarının, daha az yoğun olan, örneğin havadan, daha yoğun olan, örneğin suya geçerken yaptığı gibi; arayüzeyden kısmen yansıyıp, kısmen de kırılarak yoluna devam eder de ondan... Cismin içi her yerde aynı olsa, tek bir malzemeden oluşsa bile, en azından, onu atmosferden ayıran bir dış yüzeyi var ve bir tarafından vurduğumuzda oluşan dalgalar, içinden her yönde yayılıp da bu yüzeyin çeşitli noktalarına ulaştığında, yansımalar olur. Atmosferde zayıflayarak devam eden kırılmalar da tabii, ama zayıf...

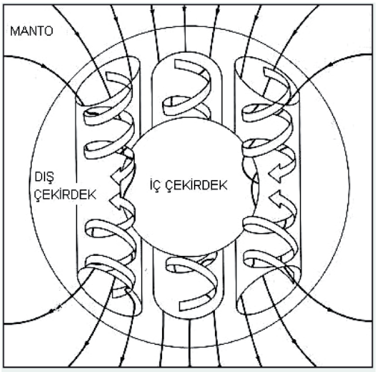
Hem de, dışa vurulan fiskenin oluşturduğu dalgalar; birincisi, bu aynı ve tek malzemenin küresel katmanlarını birbirinin üzerine doğru itekleyen basınç dalgaları (P), diğeriyse, katmanları birbirlerinin üzerinden kayarcasına enlemesine harekete zorlayan sıyırma dalgaları (*shear*, S) olmak üzere, iki türden oluşurdu. Tıpkı bir tabaktaki jölenin katmanlarının, tabağın altına bir fiske vurulduğunda, yukarıya doğru birbirini iteklemesi, tabağın yanına vurulduğunda da, birbirinin üzerinden kaymaya yeltenmesinde olduğu gibi. Aslında her iki fiske de, her iki tür dalgayı oluşturur; ama farklı güçlerde. Neyse, bunlardan P dalgaları, S dalgalarına göre daha hızlı seyahat eder ve kürenin herhangi bir başka noktasına, onlardan önce varırdı. Kulağımız ve zamanlamamız yeterince hassas olsaydı eğer, aradaki gecikmeyi ölçer ve bu gecikme süresinden hareketle, dalga hızlarını da biliyorsak, fiske darbesinin kulağımızdan ne kadar uzakta gerçekleştirildiğini hesaplayabilirdik. Sonra, yarıçapı bu uzaklığa eşit olan ve kulağımızı merkez alan bir daire çizerdik. Dalgaların kaynağının, yani fiske darbesinin indiği noktanın, bu dairenin üzerinde olması gerekirdi tabii. Hele başımızın aynı tarafında üç kulağımız olsaydı; hepsini birden dayar, aynı işlemi her kulak için yapar ve üç daire çizerdik. Bu dairelerden herhangi ikisi iki noktada kesişirken, üçüncüsü de mutlaka, bu iki noktadan birinden geçer ve bu sonuncusu bize, fiske darbesinin indirilmiş olması gereken yeri verirdi. Peki ama ya cismin içi her yerde aynı olmayıp, farklı malzemelerden oluşan çok katmanlı bir yapıya sahipse?... O zaman da söz konusu dalgalar, daha yoğun olan katmanlarda daha hızlı seyahat eder, öte yandan, benzer yoğunluklar için, katılarda hızlanıp sıvılarda yavaşlardı, ki bu da bize, değişik katmanların kalınlık ve özellikleri hakkında ipuçları sunardı. Fiske deyip geçmemek lazım, aslında bir fiske darbesi, böylesine karmaşık bir yapı hakkında da yeterli bilgi verebilir.

Çünkü, herhangi bir fiske darbesi, tek frekanslı bir P ve S dalgası çiftine değil, çeşitli frekanslardan oluşan P ve S dalga gruplarına yol açar. Belli türden bir dalganın bir ortamdaki hızı, dalganın frekansı yanında; ortamın yoğunluğuna, sıcaklık ve basınç gibi fiziksel değişkenlere de bağlıdır. Dolayısıyla, dalga grupları ortam içerisinde yol kat ettikçe, aralarındaki sürat farkı nedeniyle, giderek ayrışırlar (*dispersion*). Bu arada farklı katmanlara farklı zamanlarda ulaşıp, kısmen yansımış; kısmen de yollarına devam edip, farklı açılarla kırılmışlardır. Gerçi, en genel haliyle karmaşık bir bünyenin yapısı hakkında bilinmesi gereken; barındırdığı altyapıların geometrileri ve boyutları, yoğunlukları, sıcaklık ve basınçları gibi çok sayıda bilinmeyen vardır. Ancak buna karşılık, değişik frekanslardaki dalgaların; yansıma açılarıyla kalıpları ve seyahat süreleri, bu bilinmeyenleri belirlemeye yetecek sayıda denklem sunmaktadır. Dolayısıyla, çözüm sonuçlarının elde edilmesi ve görüntüye dönüştürülerek, iç yapının üç boyutlu bir resminin; hem de farklı yoğunluk, sıcaklık ve basınç bölgelerinin farklı renklendirilmiş haliyle inşası mümkündür. Tıpkı, sesüstü dalgalardan yararlanan 'ultrason' aygıtlarıyla, insan vücudunun iç yapısının görüntülenebilmesinde, anne rahmindeki fetusun hareketlerinin dahi gözlenebilmesinde olduğu gibi. Peki de dünyaya fiskeyi kim vuracak? O kendi kendisine vuruyor zaten, dış kabuğundaki kırılmaların ürettiği deprem dalgalarıyla. Alanca daha dar kapsamlı incelemeler için, mekanik veya buharlı çekiçler, konvansiyonel patlayıcılar da kullanmak mümkün. Bu çalışma alanına 'sismoloji' deniyor. Yerkürenin yapısını anlamaya yönelik olarak, ayrıca; yüzeyindeki ısı akışı dinamikleri, manyetik ve kütleçekimi alanlarının değişimleri incelenip, çeşitli kaya ve minerallerin fiziksel özellikleri laboratuvarlarda inceleniyor. Ortaya çıkan yapı, kabaca şöyle...



Yerküremiz; bir kabuk, manto ve çekirdek kısımlarından oluşuyor. Manto ve çekirdek ayrıca, 'iç' ve 'dış' olarak nitelendirilen ikişer kısma ayrılıyor. Kabuğun kalınlığı değişken: Kıtalarda 35-70, okyanus tabanlarında 5-10 km kadar. Zirve noktası Himalayalarda, 8.850 m yüksekliğindeki Everest tepesi. En çukur nokta, Pasifik Okyanusu'nun 10.911 m derinliğindeki Mariana Çukuru. Yapısı genelde aluminosilikat ağırlıklı. Kıtasal kısmı çoğunlukla granitten oluşuyor. Yani bu kayalar bolca, 'açık renkli' anlamında 'felsik' olarak nitelendirilen feldspar ve kuartz minerallerini içeriyor. Okyanus tabanlarındaki kabuk ise, bazalt ağırlıklı. Bazalt, 'koyu renkli' anlamında 'mafik' olarak nitelendirilen, olivin ve plagioklaz feldspar gibi mineralleri içeriyor. Kıtasal ve okyanus dibi kabuklarının, kalınlığı ve bileşimi yanında, ortalama yoğunlukları da farklı: Kıtasal kabuğunki 2,8, okyanus kabuğununki 3,3 g/cm^3. Daha ince olan okyanus kabuğunun daha yoğun olması, kıtasal kabuğu bir bakıma dengeliyor. Yerkürenin bir de, mekanik özelliklere göre tabakalandırılması söz konusu. Bu açıdan bakıldığında; kabukla birlikte, mantonun katı ve elastik olan dış kısmından oluşan katmana 'litosfer' deniyor. Litosferin hemen altında, sismik dalgaların süratinde ani bir artış var. Kaya tipinin, görece az yoğundan fazla yoğuna geçişine işaret eden bu sıçrama bölgesine, bulucusunun adına atfen 'Mohorovicic süreksizliği' deniyor. Bu süreksizliğin kıtalar altındaki, 15-20 ila 70-80 km arasında değişen derinliği, ortalama 35 km. Okyanusların altında ise, tabanın 7 km kadar altında. Dolayısıyla, dünyaya göre litosferin kalınlığı yaklaşık olarak, yumurtaya göre kabuğunun kalınlığı kadar ince. Geçmişte, yerkabuğunda bir delik açarak Moho'ya ulaşma önerileri yapılmıştı. Sovyetler Birliği zamanında Kola Yarımadası'nda bu amaçla açılmasına başlanan bir delik, maliyetler derinlikle birlikte üstel olarak arttığından, 12'nci kilometreden sonra terk edildi. Neyse...

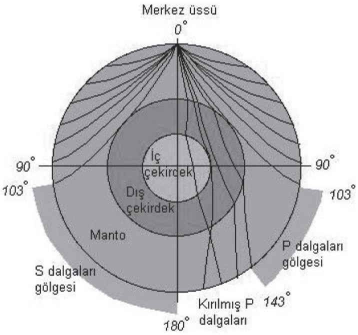
Kabuğun ardından, ağırlıklı olarak demir magnezyum silikatlarından oluşan 2900 km kalınlığındaki manto geliyor. Derinlikle birlikte sıcaklık ve basınç artıyor. Kabuğun 100-200 km altındaki sıcaklık, kayaların ergime noktasına yakın. Ancak basınç yüksek olduğundan, kayalar tümüyle eriyemiyor ve katı ile sıvı arasında,



viskozitesi yüksek ve akışkanlığı az, plastik bir halde bulunuyor. Litosferde bir çatlak veya oyuğun oluşması halinde, atmosferin düşük basıncıyla karşılaştıklarında, hızla eriyip dışarı fışkırıyor ve volkan etkinliklerine yol açıyorlar. Plastik özelliği nedeniyle sismik dalgaları düşük hızla ileten bu 'düşük hız bölgesi'nin altında, dış mantonun 'geçiş bölgesi' var. Bu bölgede, kayaların yoğunluğu iki ayrı derinlikte ansızın artarak, sismik dalgaların hı zında paralel artışlara yol açıyor. Geçiş bölgesinin altındaki iç manto, demir ve magnezyum silikat minerallerinin basit formlarından oluşuyor. Ancak bu basit formlar, derinlere inildikçe, kütlece çok daha yoğun formlara dönüşüyor. Yeriçi ısısının büyük bir kısmı mantoda. Büyük konveksiyon hücreleri ısı aktarımını sağladıkları gibi, plaka tektoniği süreçlerinin, yani yerkabuğu parçalarındaki hareketliliğin itici gücünü oluşturuyor.

2900 km derinlikte, mantodan çekirdeğe geçiş başlıyor. Sıcaklık 3700°C'yi, basınç da 125 Gpa (GigaPascal veya milyar kg/m.s^2) düzeyini aşıyor. Bu koşullar altında, nikel demir alaşımından oluşan dış çekirdek erimiş olmak zorunda. Bu yüzden, 2300 km kalınlığındaki dış çekirdeğe girişte, %30'a yakın bir yoğunluk artışına karşın, sismik dalgaların P türünün süratinde, bir o kadarlık bir düşüş gözleniyor. Bu durum ancak, ortamın sıvı halde olmasıyla mümkün. Nitekim, S dalgaları bu katman tarafından, tıpkı sıvılarda olduğu gibi, iletilemiyor. Dış çekirdeğin sıvı hali, yerin manyetik alanından da sorumlu. Çünkü, litosferde yerin manyetik alan şiddetine yol açacak kadar mıknatıslı mineral yok. Alttaki katmanlarda ise, sıcaklıklar, mıknatıslık özelliğinin ortadan kalktığı 'Curie sıcaklığı'nın üzerinde. Dolayısıyla, yerin manyetik alanını atomların manyetik dipollerinin eşyönlüleşmesiyle açıklamak imkânsız. Geriye bir olasılık kalıyor. O da, dış çekirdekteki sıvı akıntılarının yol açtığı, 'kendi kendisini ayakta tutan' bir dinamo etkisi. Bu çerçevede, yerin kendi ekseni etrafında dönmesi nedeniyle, dış çekirdeğin alt ve üst yarısında zıt yönlerde spiral akıntıların oluştuğu, bu akıntıların taşıdığı sıvı demirin elektrik iletkenliğinin, keza zıt yönlü spiral akımlar oluşturduğu düşünülüyor. Böyle bir akım şemasının, yandaki şekilde görüldüğü gibi, yerin dönme eksenine yaklaşık paralel bir manyetik alan oluşturması mümkün. Akış dinamiğindeki değişimlerin, manyetik alanın yönünü değiştirmesi de...

Son olarak, 5200 km'ye inildiğinde, sıcaklık 4300°C'yi aşarken, çekirdeğin iç kısmına girilmiş oluyor. 1200 km kalınlığındaki bu katman, hemen tümüyle demir. Sıcaklığın, dünyanın merkezinde 5200°C'ye ulaşmasına karşın, basınç 325 Gpa'lı aşmış olduğundan, iç çekirdek katı halde.

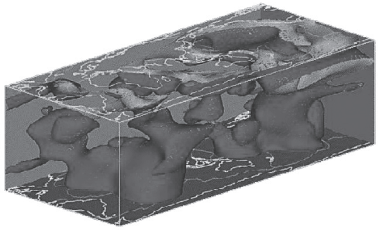


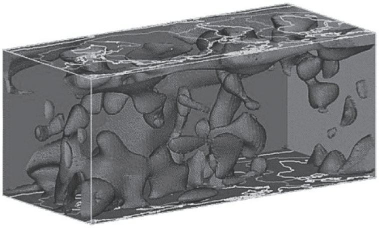
Şimdi bu verilerin ışığında, yerin altında neler oluyor, kısaca bakalım...

Yerkürenin herhangi, örneğin yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi bir 'merkez üssü'nde yer alan depremin yol açtığı dalgalar, mantonun içinden seyahat ederek, sağda ve solda 103° açı konumlarına kadar ulaşabiliyor. Daha sonra, 143° açı konumuna kadar, P dalgalarının ulaşamadığı bir 'P dalgaları gölgesi' var. Bundan daha büyük açı konumlarına ancak, çekirdekten geçerek kırılan P dalgalarının ulaşması mümkün. S dalgaları ise zaten, sıvı dış çekirdek tarafından iletilemediklerinden, 103° açı konumundan öteye geçemiyorlar. Gölge alanları daha geniş...

Litosfer yedisi büyük, bir düzine kadar plakalara ayrılmış durumda. Bu plakalardan bazıları, kısmen kıtasal olup, kısmen de okyanus tabanını kapsıyor. Tektonik kuvvetler nedeniyle, birbirlerine göre hareket halindeler. Litosferin parçalan adeta, dış mantonun kısmen sıvı olan en üst, 'astenosfer' katmanı üzerinde yüzüyor. Bazı plakalar birbirine yaklaşırken, diğer bazıları birbirinden uzaklaşıyor. Plakaların birbirine yaklaştığı sınırlara 'yakınsak' (*convergent*), uzaklaştığı sınırlara 'ıraksak' (*divergent*) sınır deniyor. Plakaların bir de, sınır boyunca birbirlerine göre kayma hareketi var, ki buna da, 'muhafazakâr' (*conservative*) sınır deniyor. Kuzey Anadolu ve Kaliforniya'daki San Andreas fay hatları, bu sonuncusuna birer örnek...

Pasifik ve Atlantik okyanuslarının ortasından geçen birer ıraksak sınır var. Örneğin Atlantik ortası sınırın altında yer alan 'sıcak nokta'daki mantodan kabaran magma, Avrupa ve Amerika plakalarını dışarıya doğru iterek birbirinden uzaklaştırıyor. Magmanın, bu arada oluşan yarıklardan çıkan kısmı, katılaşarak yeni kabuk oluşturuyor. Çıkamayıp geri dönen kısmı ise, tekrar dibe dalarak, konveksiyon hücrelerini ayakta tutuyor. Bu yüzden çıkıntı boyunca iki tarafta dağ





silsileleri oluşmuş durumda ve dipteki kabuk sürekli yenileniyor. Buna, 'deniz tabanının yayılması' deniyor. Oluşan bazalt kayalar bir miktar manyetik mineral içerdiklerinden, dünyanın manyetik alanı o sıralar hangi yönde ise, o yönde mıknatıslık kazanarak donuyorlar. Öte yandan, manyetik kutuplar periyodik olarak yer değiştirdiğinden, okyanus ortası çıkıntının iki yanındaki kayalar, çıkıntıya paralel şeritler halinde, değişik yönlerde mıknatıslanmış bölgeler sergiliyor. Çıkıntının zıt taraflarındaki aynı dönemde oluşmuş olan 'karşılıklı şerit çiftleri' eşyönlü, aynı tarafında olup da birbirini izleyen şeritler ise zıt yönlerde olmak üzere... Plaka tektoniği kuramının bir diğer kanıtı da bu.

Sonuç olarak, okyanus tabanındaki en eski kayalar, ancak 100-65 milyon yıl öncesi arasındaki Kretasaz (*Cretaceous*) dönemine kadar gidiyor. Eski kabuk ise, 'dalma bölgesi' de denilen yakınsak sınırlarda, mantoya dalıp (*subduction*) eriyor. Okyanus kabuğu örneğin, kıtasal bir plakaya karşı ilerlediğinde, daha yoğun olduğundan alta dalarak, daldığı hat boyunca bir çukur oluşturuyor. Derine indikçe ısınıp eriyor ve bu arada bulduğu çatlaklardan geri fışkırıp 'ada yayları'na vücut veriyor. Dalmaya devam eden parçaları ise, soğuk kütleler halinde mantonun derinliklerine doğru yol almaktadır. Bazen de iki kıtasal plaka yakınsak sınırda buluştuğunda, biri diğerine göre ağır basıp alta dalamadığından, birbirlerini omuzlayarak, kırılma ve yükselmelere yol açarlar. Asya palakasıyla Hint plakasının çarpışma sürecinde oluşan Himalayalar örneğinde olduğu gibi.

Yukarıdaki şekilde üstte, düz halde görüntülenmiş olan mantoya güneydoğudan bakıldığında, içinden yükselmekte olan, görece hafif, dev sıcak kütleler görülüyor. Gerçi haritaları seçmek güç. Ama bunlardan, doğrudan sıvı dış çekirdekten kaynaklanmış olan birisi, Doğu Pasifik Çıkıntısı'nın yayılmasını beslemekte. Altta ise, kuzeybatıdan bakıldığında, mantoya gömülmekte olan soğuk kütlelerin görüntüsü var. Dünyanın karnındaki bebekler bunlar. Tek kelimeyle büyüleyici. Nereden nereye, karpuzun içindeki tınlamadan...

Anlaşılan, dünyamız için için kaynıyor. Da peki, dışarıda ne yapıyor? Atmosferde...

DÜNYA'NIN ATMOSFERİ

BİLEŞİM

Ne var yerin üstünde: Hava. Nedir hava, nelerden oluşur? Alırsın bir litre, soğutursun soğutabildiğin kadar ve sırası gelen gaz sıvılaştığında, ayırıp tartarsın: Sıfır kelvine, mutlak sıfıra yaklaşabildiğin kadar devam. Bu soğutma işlemi ve düşük sıcaklıklarda çalışmak güçse eğer, havayı ayrıştırmanın başka yöntemleri de var; örneğin kütle spektrometresi. Neyse: Geride pek bir şey kalmayınca, o bir litre havanın içindeki çeşitli gazların ağırlıklarını bulmuş olursun. Bunların toplam ağırlığa oranları, ağırlık oranlarını verir veya ağırlıkları molekül ağırlıklarına bölüp, mol sayılarını bulursun. Bir mol gaz, ideal gaz, deniz düzeyi koşullarında 22,4 litre hacim kapladığına göre, mol sayılarından hareketle, hacimsel oranlar bulunur. Havanın bileşimi çıkar ortaya. Nedir o?...

Kuru Atmosferin Bileşimi

	Hacimsel % veya milyonda bir (ppmv)	Kütlesel % veya milyonda bir (ppmm)
Nitrojen	%78,084	%75,523
Oksijen	%20,946	%23,133
Argon	%0,9340	%1,288
Karbondioksit	365 ppmv	530 ppmm
Neon	18,18 ppmv	12,67 ppmm
Helyum	5,24 ppmv	7,24 ppmm
Metan	1,745 ppmv	2,9 ppmm
Kripton	1,14 ppmv	3,3 ppmm
Hidrojen	0,55 ppmv	3,8 ppmm
Su buharı	Çok değişken; %0-7, genellikle %1 kadar.	

Hacimsel olarak; %78 nitrojen, %21 oksijen, %1 argon. Kütlesel oranlar, molekül ağırlıklarının farklılığı nedeniyle, biraz değişik. Bu bileşim küçük miktarlarda; nitrus oksitler (0,5 ppmv), ksenon (0,09 ppmv), ozon (%0-0,07 ppmv, kışın 0-0,02 ppmv), nitrojen dioksit (0,02 ppmv), iyot (0,01 ppmv) ile, eser miktarlarda karbonmonoksit ve amonyak da içeriyor. Bu bileşimdeki gazlardan bazılarının, oranları küçük olmakla beraber, işlevi önemli. Örneğin ozon...

Fakat bu bileşim, her yerde aynı değil; hava karışmıyorsa eğer, yükseldikçe değişir. Ne de olsa atmosferi yeryüzüne bağlı tutan, yerin kütleçekimi; durağan bir atmosferde en ağır gazlar dipte daha yoğun olmalı. Hafif olanlar daha ziyade üstte yüzüyor, suyun üstünde yağ gibi. Karışma yoksa tabii. Hem öyle; hem de yükseldikçe atmosfer seyreliyor olmalı, kesin bir sınırı yok. Peki ne kadar hava var yeryüzeyinde, atmosferi oluşturan?...

BASINÇ VE SICAKLIK

Upuzun bir tüp düşün, bir ucu yerde, bir ucu da gökyüzünde; atmosferin dışına kadar uzanıyor. Kesit alanı 1 cm^2 olsun, birim alan. Uçları da açık, ki içi hava dolsun. Bu durumda, tüpü yerdeki ucunu parmağınla kapattığında, parmak ucunda, tüpteki havanın tüm ağırlığını hissedersin. Birim alan başına atmosferin ağırlığı bu. Bildiğimiz basınç yani, deniz düzeyindeki. Böyle bir tüp bulamayacağımıza göre, nasıl ölçeriz bu basıncı?... Basit: Evangelista Toricelli 1643 yılında barometreyi bulmuş zaten, Galileo'nun öğrencisi. Al uzunca bir tüpü, U şeklinde kıvır; uçları yukarı gelecek şekilde tutup, içine, diyelim su doldur. Uçlardan birini, diyelim sağdakini, tam su seviyesinden eritip kaynat; ki içinde hava kalmamış olsun. Sonra tüpü ters çevir, ki ucu açık olan koldan su akabildiği kadar aksın. Hepsi akmayacaktır, çünkü diğer ucu vakumlu. Tüpü tekrar ters çevirip kollarını yukarı doğru verdiğimizde, ucu kapalı olan sağ koldaki suyun düzeyi, açık olan sol koldakinden daha yüksek olur. Çünkü sol koldaki suyun yüzeyinde atmosfer basıncı vardır, halbuki sağdakinin üzerinde boşluk; olsa olsa bir miktar su buharı... Düzeyler arasındaki yükseklik farkına Δy diyelim. Bu durumda sağ koldaki, taban alanı 1 cm^2 olan Δy yüksekliğindeki suyun ağırlığını, sol koldaki 1 cm^2'lik açık yüzeye etki eden atmosfer basıncı ayakta tutmaktadır. Basıncın değeri o halde $\rho g \Delta y$, suyun yoğunluğu ρ ise...

Ancak bildiğimiz gibi, su kullanırsak Δy'nin 1.013 cm olması gerekir, yani 10 metreden fazla. Bu yüzden, olabildiğince daha yoğun bir başka sıvı kullanmak, daha kullanışlı. Örneğin, yoğunluğu 13,6 g/cm^3 olan cıva, Δy'yi 76 cm'ye indirir. Kısacası; deniz düzeyindeki cm^2 başına düşen havanın kütlesi, 76 cm^3 civanınkine, yani 76x13,6 grama eşit. Yaklaşık 1 kg/cm^2. "Hava cıva" deyip geçmemek lazım, bu bizim için büyük bir kütle; omuzlarımıza binen ağırlığını, ayaklarımızla yere iletseydik eğer. Ayak tabanlarımızın, her birini 10x20 cm'lik dikdörtgen şeklinde varsaysak, toplam 400 cm^2'lik taban alanımızın, 400x1=400 kg'lık kütle taşıması gerekirdi. Durduğumuz yerde; kendi kütlemize ek olarak, 400 kg hava: Niye hissetmiyoruz bunu?... E, havanın basıncı, ayaklarımızın altında da var da ondan. Altları vakumlu değil ki, tabanlarımız vantuz olsun. O yüzden havayı sırtımızda taşımıyoruz. Tam tersine, havanın içinde yüzüyor ve Arşimed ilkesine göre, taşırdığımız havanın ağırlığı kadar ağırlığımızdan kaybedip, hafifliyoruz. Az biraz; hacmi büyük olanlarımız görece fazla, diğerlerimiz az. Kayda değer bir miktar değil bu ama. Havanın yoğunluğu 1,2 kg/m^3 civarında, hacmimiz ise 0,2 m^3'ten az olduğundan, 240 gram kadar. Kayda değer olan, atmosferin toplam kütlesi: Nedir o, M_A?...

Dünyanın yarıçapı R_D=6.370 km=6,37x10^8 cm. Yüzey alanı $A_D=4\pi R_D^2=4\pi x(6,37x10^8\ cm)^2=5,1x10\ ^{18}cm^2$. Bu yüzeyin her cm^2'sinin üzerinde yaklaşık 1 kg hava bulunduğuna göre; atmosferin toplam kütlesi, $M_A=(1kg/cm^2)x(A_Dcm^2)=5,1x10^{18}$ kg olur. Dünyanın kütlesi ise $M_D=6x10^{24}$ kg. O halde M_A/M_D oranı: $0,85x10^{-8}$. Milyonda 0,85 yani; dünyanın, atmosfer dahil toplam kütlesinin milyonda 0,85'i hava. Peki bu kadar hava, deniz düzeyindeki $\rho_A=1,2\ kg/m^3$'lük yoğunluğuyla homojen olarak dağılmış olsaydı, deniz yüzeyinden yukarı hangi yüksekliğe kadar tırmanırdı? Dünyanın küresel yüzeyini, sanki düzlemsel bir alanmış gibi düşünüp; ki bunu yapabiliriz, dünyanın yarıçapı atmosferin kalınlığına göre çok büyükse; üzerine h yüksekliğinde bir atmosfer koyalım: Atmosferin toplam hacmi, $V_A=h.A_D$ olurdu, yaklaşık olarak. Öte yandan bu hacim M_A/ρ_A'ya eşit, yani $h.A_D=M_A/\rho_A$ olmak zorunda. Öyleyse, $h=M_A/(\rho_A.A_D)=5,1x10^{18}\ kg/(1,2\ kg/m^3)/(5,1x10^{14}\ m^2)=8.300$ m. Veya 8,3 km. Atmosferin yoğunluğu sabit değil tabii, yükseldikçe azalıyor. Basınç azaldıkça seyrelip, sıcaklık arttıkça genleşip, azalıyor. Hem de üstel olarak. Dolayısıyla, atmosfer kalınlığı aslında, kesin bir sınırı olmamakla beraber, bundan bir hayli fazla. Ama bu değerin 10 katından çok daha fazla olacak hali de yoktur herhalde, 80-100 km'den. Sıcaklık?...

Sıcaklık daha basit. Alırsın bir tüp; bu sefer kısa olabilir; havasını boşaltıp, içine biraz sıvı koyarsın; iki ucunu da kaynattın mı, olur termometre. İçindeki sıvı ısındıkça, boşluğa karşı genleşir ve eğer genleşme miktarı sıcaklıkla doğru orantılıysa; sıvı yüksekliğindeki oynamalar, sıcaklık değişimlerini verir. İlk termometreyi 1593 yılında Galileo keşfetmiş, Toricelli'nin hocası. Aslında, sıcaklıktan etkilenen herhangi bir şey termometre olarak kullanılabilir. Yeter ki bu etki, güvenilir bir göstergeye bağlanabilsin; yani sıcaklığa bağlı olarak, uygun bir şekilde ölçeklendirilebilsin. Neyse. Bu iki temel aygıtla atmosferin yüksekliklerinde ölçüm nasıl yapılacak? Bir kere; yeryüzü coğrafyasının yüksek noktalarına tırmanılabilir, bu bir. İkincisi; rastlayıp ölçtüğü en yüksek ve en düşük sıcaklık ve basıncı kaydedecek birer aygıt, bir uçurtmaya bağlanıp uçurtulabilir. 18. ve 19. yüzyıllarda atmosfer verileri böyle toplanırdı. Tevekkeli Benjamin Franklin uçurtmaya o kadar meraklıymış, sınırlı imkânlarla çalışan onca bilim insanından yalnızca birisi olmasından dolayı. Bu yöntemle 3 km yüksekliklere kadar ulaşılabilir. Balonların ise, dikey erimi 50 km kadar. Ancak yatayda fazla hareketli olduklarından; sonradan tekrar bulunup, ölçümlerinin okunması lazım, ki bu her zaman mümkün değil. Halbuki Markoni'nin radyoyu keşfetmesinden ve işlevsel bir radyonun küçültülmesinden sonra, 1930'lu yıllarda, 'radyosonda' denilen rasat balonlarının, ölçümlerini radyo dalgalarıyla yere iletmeleri mümkün oldu ve balonların peşinden koşuşturmaca son buldu. 1960'lı yıllarda ise, çok daha yükseklere tırmanabilen 'atmosfer inceleme uçakları' ve uydular vardı. Değişik yüksekliklerde ölçümler yapılıp, hava örnekleri alındı. Şimdi artık, Doppler etkisine dayalı ölçümler yapan radarlarla donanımlı 'rasat uyduları', hava tahminlerine yönelik kısa vadeli verileri büyük bir hızla toplayabildikleri gibi, iklimdeki uzun vadeli değişimlerin belirtilerini de arıyorlar. Yapılan ayrıntılı incelemelere göre, durum kabaca şöyle...

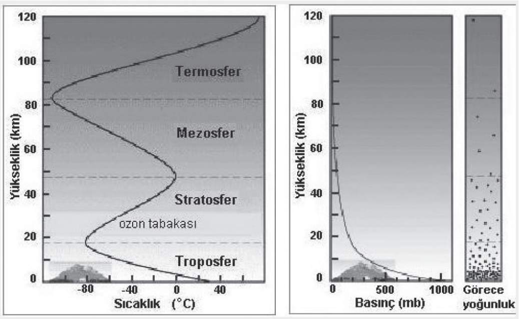
KATMANLAR

Konum ve zamanla bağlı olarak değişmekle beraber, atmosferin deniz düzeyindeki yoğunluğu 1,2 kg/m^3. Basıncı 1 atm veya 1,013 bar, yani 101.300 N/m^2 ya da Paskal. Sıcaklık, ortalama 14°C kadar. Yükseklik arttıkça; yoğunluk üstel olarak sürekli azalırken; sıcaklık önce azalıp sonra artıyor, sonra yine tekrar. Dolayısıyla, sıcaklık değişimlerine göre, atmosferi kabaca dört katmana ayırmak mümkün: Troposfer, stratosfer, mezosfer, termosfer.

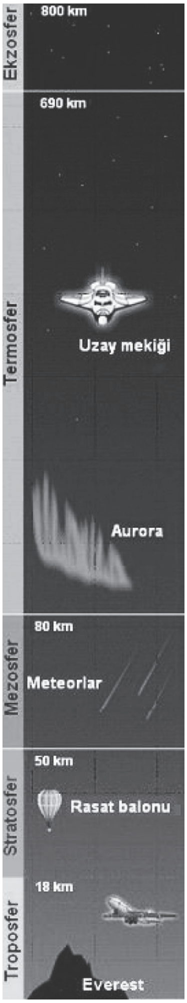
Troposfer, hava paketlerinin yükselip alçaldığı ve iklim olaylarının hemen tümünün yer aldığı katman. Kalınlığı, enleme ve hava durumuna bağlı olarak, 7-17 km arasında değişiyor. Deniz düzeyinde 1 atm olan basınç, ilk 5 km'nin sonunda %50, katman sınırında %90 oranında azalıyor ve bu; atmosferin toplam kütlesinin, sırasıyla

%50'sinin ve %90'ının bu ince kabuklar içerisinde bulunduğu anlamına geliyor. Örneğin, Everest'in 8.856 m yüksekliğindeki zirvesinde 300 milibar, yani deniz düzeyindeki 1 atm'in üçte birinden az. Tırmanıcılar bu yüzden, oksijen tankı ve maskesi kullanmak zorunda. Sıcaklık keza, yükseklikle birlikte azalıyor. Bu da beklenen bir durum. Yerkabuğu güneşten gelen ışınlarla ısındığına ve radyoaktif kökenlisi de dahil olmak üzere yerin iç ısısı kabuktan dışarıya verilmekte olduğuna göre; litosfer, atmosferin bu en alt katmanına göre daha sıcak ve litosferden uzaklaşıp troposferde tırmandıkça, hava sıcaklığı azalmak zorunda. Ölçüme dayalı değişim formülleri farklılık göstermekle beraber, her km'de yaklaşık 6°C kadar. Dolayısıyla; deniz düzeyinde 14°C olan ortalama sıcaklık, katman sınırında -52°C'ye kadar iniyor. Örneğin Everest'in zirvesinde, -39°C olması gerekirken, ölçümler -36°C veriyor. Troposferle bir sonraki katman arasında, *tropo-pause* denilen ince bir geçiş tabakası var. Bu ikisine birlikte, 'alt atmosfer' de deniyor.

Troposferden sonraki katman, 50 km yüksekliğe kadar tırmanan stratosfer. Buradaki hava kuru ve daha az yoğun. Hava hareketleri hâlâ var, ama çoğunlukla yatay. Sıcaklık yükseklikle birlikte, -3°C'ye kadar artıyor. Demek ki bu katmanda bir enerji kaynağı var. O da, güneşten gelen morüstü (*ultraviolet*) ışınların yüksek frekanslı kısmını soğuran ve böylelikle, yeryüzündeki hayatı bu ışınların zararlı etkilerinden koruyan, yaklaşık 12 km kalınlığındaki ozon tabakası. Gerçi 'ozon tabakası', yanıltıcı bir isim. Çünkü ozon aslında, buradaki hava bileşiminin küçük bir kısmını oluşturuyor. 1990'lı yıllarda bu tabakanın insan yapımı kloroflorokarbon bileşiklerinin etkisiyle, başta Antarktika üzerinde olmak üzere bazı bölgelerde inceldiği belirlenince, söz konusu bileşiklerin kullanımından vazgeçildi. Troposfer; bir sonraki katmandan, yani mezosferden, 'tropopoz' (*tropopause*) denilen ince bir tabakayla ayrılıyor.



50 km ile 80-85 km arasında yer alan mezosferde, sıcaklık tekrar azalma eğilimine giriyor ve katmanın, 'mezopoz' (*mesopause*) denilen dış sınırında -93°C'ye düşüyor. Stratosfer ve mezosfere, stratopoz ve mezopoz tabakalarıyla birlikte, 'orta



atmosfer' de deniyor. ATLAS Uzay Laboratuvarı misyonu kapsamında ayrıntılı olarak incelendi. Orta atmosferde 80 km yüksekliğin üstüne çıkanlar, ABD'de 'astronot' olarak nitelendiriliyor.

Bir sonraki katman; 80-85 km'den başlayıp, 640 km'den yukarısına kadar uzanan termosfer. Havası çok seyrelmiş olmakla beraber, güneşten gelen en yüksek enerjili foton veya parçacıkları soğuruyor. Dolayısıyla, sıcaklık yükseklikle birlikte artarak, 1.727°C'ye kadar ulaşabiliyor. Atomlarının çoğu iyonlaşmış halde olduğundan, bu katmana 'iyonosfer' de deniyor. İyon katmanının radyo dalgalarını yansıtıyor olması, yeryüzeyindeki uzun mesafe radyo iletişimini mümkün kılıyor. İyonosferin yapısı, Güneş'teki patlamaların fırlattığı ve çoğunlukla yüksek enerjili protonlardan (~500 keV) oluşan 'Güneş rüzgârı'ndan ciddi şekilde etkileniyor. Bu rüzgârın gücü Güneş'in etkinlik düzeyine bağlı olduğundan, iyonosfer üzerindeki etkisi de zamanla değişken. Ancak, kimyasal tepkimeler yüksek sıcaklık nedeniyle, yeryüzeyindekine oranla çok daha hızlı seyrettiğinden; iyonosfer, yapısındaki değişiklikleri hızla onarma yeteneğine sahip. 'Üst atmosfer' olarak da nitelendirilen bu katman, 'Tasmalı Uydu Misyonu'nca (Tethered Satellite Mission, TSS-1R) incelenecek. Tasma; termosferde gezinecek olan inceleme uydusunu, daha alçakların görece güvenli ortamında seyreden bir uzay aracına bağlayan halat...

100 km'nin altındaki atmosfer, yükseklikle birlikte seyrelmekle beraber, oldukça iyi karıştığından, yaklaşık olarak aynı bileşime sahip. Fakat 100 km'nin üstünde bu bileşim, karışıma etkilerinin yokluğu nedeniyle, yükseklikle birlikte değişmeye başlıyor. Çünkü; gerçi her gaz yükseklikle üstel olarak, fakat daha ağır olanları daha hızlı seyrelmek zorunda. Dolayısıyla, oksijen ve nitrojen gibi molekül ağırlığı görece yüksek olan gazlar, helyum ve hidrojen gibi hafif moleküllü gazlardan daha hızlı seyreliyor. Sonuç olarak, termosferin dış kısmı; 'heterosfer' olarak adlandırılan ve sırasıyla helyum, molekül halindeki hidrojen ve atom halindeki hidrojen gazlarının egemen olduğu bir bölge içeriyor. Bu bölgenin yüksekliği ve

içerdiği tabakaların kalınlıkları, sıcaklığa bağlı olarak değişken. Uzay araçlarının atmosfere girişinde, atmosferin varlığı 120 km'nin altında hissedilmeye başlanıyor. 100 km'de ise, bazen atmosferle uzay arasındaki sınır olarak kullanılan ve ünlü akışkanlar dinamikçisi Theodore von Karman'ın anısına atfen adlandırılmış olan 'Karman sınırı' var. Fakat, atmosferin aslında kesin bir sınırı yok. Termosferin ötesinde seyrelmeye devam ederek, gezegenlerarası gazlarla karışıyor. Çok düşük yoğunluklardaki hidrojen ve helyum, ekzosfer denilen bu bölgedeki ana bileşenler. Öte yandan, Dünya'nın manyetik alanı, on binlerce kilometre ötelere uzanıyor ve Güneş rüzgârını oluşturan yüklü parçacıkların vücut verdiği manyetik alanın etkisiyle, Güneş'e zıt yönde uzun bir kuyruk oluşturuyor. Manyetosfer denilen bu bölge, rüzgârın getirdiği yüksek enerjili yüklü parçacıkları yakalayıp sarmal yörüngelerde yavaşlatarak, dünyayı bu en tehlikeli kozmik ışınların hışmından koruyan bir kalkan görevi görüyor. Van Ailen radyasyon kuşağında hapsolan iyonlar, kutup bölgesinde atmosfere girdiklerinde, 'Kutup Işıkları' da denilen 'aurora' ışımasına yol açıyor.

Peki: Bizim içinde yaşadığımız troposferde neler oluyor? Nasıl?...

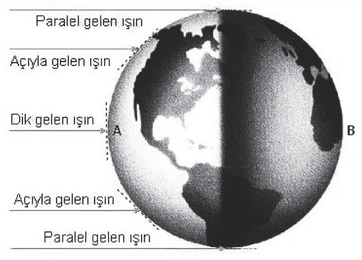
ATMOSFER VE İKLİM

Önce, Dünya'yı durduralım. Sonra atmosferiyle birlikte alıp, içinde eser miktarlarda hidrojen ve helyum barındıran bir boşluğa koyalım. Etrafında, Güneş veya benzeri ışıyan bir gökcismi bulunmasın. Bu durumda boşluk, evrenin ortalama 2,73 K civarındaki sıcaklığında olacağından, halbuki yerkürenin içi çok daha sıcak ve hatta radyoaktivite kaynaklı ısı üretiyor olduğundan, Dünya hızla soğumaya başlar...

Katı kabuğunun dış yüzeyi, temasa geldiği hava moleküllerine kinetik enerji aktarmakta, iletim (kondüksiyon) yoluyla soğumaktadır. Isınan moleküller, havanın genleşmesiyle birlikte yükselir ve kazandıkları kinetik enerjiyi üst katmanlara iletirler. Yerkabuğu ayrıca, her sıcak cisim gibi ışımakta, 'radyasyon' yoluyla da soğumaktadır. Işıdığı fotonlardan bazıları, atmosferdeki molekül ya da atomlar tarafından soğurulur. Bunun sonucunda ya da birbirleriyle çarpışmaları sırasında, bazen bazı atomlar iyonlaşırken, bazen de molekül bağlarından bazıları kırılmaktadır. Diğer yandan, iyonların bir araya gelip nötr atomlara, atomların bağ kurup tekrar moleküllere vücut verdiği de olur. Bu birleşmeler sırasında açığa çıkan enerji, çoğunlukla ışıma şeklindedir. Dolayısıyla, atmosferde; foton soğurmaları eşliğinde atom iyonlaşmaları ve molekül parçalanmaları, birleşmeler sonucunda tekrar foton ışımaları, her birim hacim içerisinde trilyonlarcasıyla sürüp gitmekte, fakat atmosferden çıkan fotonlar geri dönmemektedir. Sonuçta soğumayı sağlayan da zaten, boşluğa sızan bu fotonlardır.

Atmosferdeki nem yoğuşmaya ve okyanuslarla göller, suyun özgün cilvesi gereği üstten alta doğru donmaya başlar. Zaman geçtikçe, atmosferdeki diğer gazlar (sırasıyla karbondioksit, metan, oksijen, nitrojen) önce sıvılaşıp, sonra donar. İç ısı azaldıkça, litosfer kalınlaşmakta, yerkabuğu plakaları birbirine kaynamaktadır. Tektonik hareketler azalırken, deprem etkinlikleri son bulur. Dış çekirdek katılaştığında, yerin manyetik alanı yok olmuştur. Bu arada hayat da çoktan... Sonunda geriye, en dışta helyum gazı ve biraz hidrojenle, altta kaskatı bir küre kalır. Karanlığın ortasında...

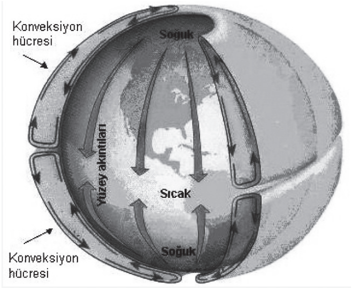
Şimdi Güneş'i alıp, dünyanın karşısına koyalım. Dünya hâlâ durağan. "Ama bu nasıl olur, kütleçekimi nedeniyle Güneş'in içine



düşmez mi?" derseniz, haklısınız. Diyelim, uygun kütlelere sahip birkaç karadelik alıp, uygun yörüngelere yerleştirdik. Öyle ki; Dünya ile Güneş, bu karadeliklerin uyguladığı kütleçekimi kuvvetlerinin toplamının sıfır olduğu noktalardan (Lagrange noktaları) ikisinde duruyor ve birbirine bakıyor olsunlar. Bu durumda; Dünya'nın 'ön' yarısı hep aydınlık, arkası hep karanlıktır. Aydınlıkla karanlığın buluşma hattına, ki bu, merkezden geçen bir 'büyük daire' oluşturur; 'solar terminatör' denir...

Dünya ısınmaya başlamıştır. Atmosfer bileşenleri zamanla, önceki durumun tersi sırayla; önce sıvılaşıp, sonra gaz haline geçer. Ancak, ısınma her yerde aynı değildir. Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi; aydınlık yarının göbeğine (A) düşen ışınlar yüzeye dik gelmekte, halbuki terminatöre ulaşanlar yere paralel seyretmektedir. Arka yarıysa, hiç ışın almaz. Dolayısıyla, birim alan başına soğurma miktarı; A noktasında en fazlayken, bu noktadan uzaklaştıkça azalıp, terminatörde sıfıra yaklaşır. Isınmadaki bu farklılık, oluşmakta olan atmosferde sıcaklık gradiyentlerine; bu da, termodinamiğin ikinci yasası gereği "her nerede gradiyent, orada hareket" olduğuna göre; hava hareketlerine yol açar. Şöyle ki; A noktasında ısınıp genleşen hava yükselir ve giderek büyüyen dairesel cepheler halinde, üst katmanlarda yayılır. Karşılaştığı havayı ısıtırken, kendisi soğumaktadır. Terminatöre doğru yol aldıkça, soğuyup ağırlaşır ve yerçekiminin etkisiyle bir yerlerde, dairesel bir cephe halinde dibe dalar. Geride A noktasındaysa, bir alçak basınç merkezi oluşmuştur. Komşu yüzey bölgelerin, görece soğuk olan basıncı yüksek havası, bu noktaya doğru akmaya başlar. Dolayısıyla, üst katmanlarda; A noktasından dışarıya doğru yayılırken soğuyan görece sıcak bir hava akımı yaşanmakta, yere yakın yüzeydeyse; yukarıdaki soğuk havanın dibe daldığı dairenin çevresinden başlayarak, A noktasına doğru süzülürken ısınan, görece soğuk bir hava hareketi yer almaktadır. Döngü kapanmıştır ve bir 'konveksiyon hücresi'nin oluştuğu söylenir. Hücre zamanla genişleyip, terminatörü geçer ve arka yüzeyin en soğuk noktası olan B'ye kadar ulaşır. Hücre akımı sayesinde, arka yüz de ısınmaktadır.

Hal böyleyken, şimdi de tutup Güneş'i, Dünya'yı merkez alan dairesel bir yörünge üzerinde dolaştırmaya başlayalım. Kütleçekiminin $1/r^2$ niteliği nedeniyle, hareket düzlemsel olacak ve yörünge düzle-



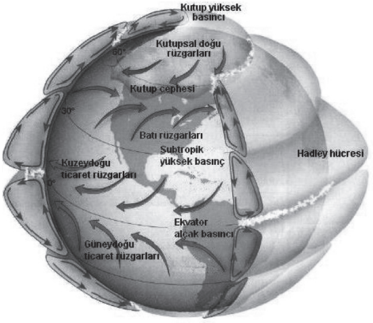
mi Dünya'nın merkezinden geçecektir. Yeryüzündeki herhangi bir nokta için, Güneş artık doğup batmakta olduğundan ve hem de bunu, ufkun hep aynı noktasında belirip hep aynı noktasında kaybolarak yaptığından, şimdi artık bir 'doğu' ile 'batı' yönleri vardır. Dolayısıyla, bir de 'kuzey' ve 'güney' yönleriyle kutupları olacaktır. "Hangisi kuzey, hangisi güney?..." Sağ elimizin parmaklarını Güneş'in yörünge hareketi doğrultusunda kıvırdıktan sonra başparmağımızı dikleştirdiğimizde, bu parmağın işaret ettiği yöne kuzey, ona zıt yöne de güney diyelim. Yani öyle ki, kuzeyden aşağıya doğru bakıldığında, Güneş, Dünya'nın etrafında saatin tersi yönde dolaşıyor olsun. Dünya'nın kutup eksenine dik olan en büyük dairesi ekvator, bunu içeren düzlem de ekvator düzlemi... Ekvator düzlemi bu hayali durumda, Güneş'in yörünge düzlemiyle çakışmaktadır vs. Neyse...

Bu durumda, zaman üzerinden ortalama olarak, herhangi bir enlemdeki noktaların hepsi aynı miktarda ışın soğurmakta ve soğurma miktarı, ekvatorda en fazla olup, kutuplara doğru azalmaktadır. Ekvatorda ısınıp genleşen hava yükselip, üst katmanların üzerinden kutuplara doğru akacak ve yüksek enlemlerin birinde yeterince soğuyarak dibe dalacaktır. Ekvator civarındaki yeryüzeyinde bıraktığı alçak basınç seridiyse; kuzey ve güney komşu enlemlerden gelen, görece soğuk ve yoğun havanın, yüzeysel akımına uğrar. Kısacası, yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi, kuzey ve güney yarımkürelerde, birbirinin ayna simetriği birer konveksiyon hücresi oluşmuştur.

Eğer bu arada, "Güneş'i Dünya etrafında nasıl dolaştırırız" dediyseniz, haklı olarak; bu sorunun yanıtı için, başlangıçta kullandığımız karadeliklerin özelliklerini listeleyen bir belgeyle birlikte, iyi bir 'yörünge mühendisi'ne başvurmak lazım. Ama hadi ondan vazgeçelim ve Güneş'i (yaklaşık) sabit tutup, Dünya'yı onun etrafında dolaştıralım. Bu durumda, karadelikleri de kaldırıp atabiliriz. Peki, bir önceki durumdaki kuzey ve güney yönlerinin hâlâ geçerli olması için, Dünya'yı yörüngesinde hangi yönde dolaştıracağız? Demin kuzeyden bakıldığında Güneş, Dünya'nın etrafında saatin tersi yönde dolaştığına göre, şimdi de Dünya'nın, aynı kuzeyden bakıldığında, Güneş etrafında yine saatin tersi yönde dolaşması gerekir; ki, kuzeyle güneyi belirlemekte kullanmış olduğumuz sağ el kuralı geçerliliğini korusun. Peki, yörünge periyodu ne olsun? Bildiğimiz yıl... Gece gündüz? Dünya kendi etrafında dönmüyorsa eğer, yani günün uzunluğu sonsuzsa: 6 ay gece olur, 6 ay da gündüz. Gece-gündüz döngüsü bir yıl sürer: fazla uzun. Döndürelim, yılda bir tur: O zaman, günü bir yıl olur. Hem de şöyle: Dünya bu sefer, Güneş'e hep aynı yüzünü gösterir, ya da arkasını. Ay'ın bize yaptığı gibi: Hoş değil. İlginç ama: Güneş'in etrafında yılda bir tur atan Dünya'nın; spini yoksa, günü sonsuz, gece-gündüz döngüsü bir yıl... Bir yıl periyotlu bir spini varsa; o zaman da günü bir yıl, gece-gündüz döngüsü sonsuz. Birincisinde gece-gündüz döngüsü var, ikincisinde yok. O halde bu ikincisi, yani Güneş'e hep aynı yüzü göstereni; atmosfer hareketleri açısından; en başta irdelediğimiz, durağan Dünya'nın karşısında durağan Güneş incelemesine eşdeğer. Yani, aynı durumu karadelik kullanmaksızın elde etmenin bir yolu. Neyse: Gece-gündüz?...

En iyisi; bildiğimiz mevcut duruma benzer şekilde, Dünya, Güneş'in etrafında yılda bir kez dolanıyor, kendi etrafında da yılda 365 küsur kez dönüyor olsun. Dönme hangi eksen etrafında? Bir önceki durumdaki doğu ve batı yönlerinin hâlâ geçerli olması için, Dünya'nın kuzey-güney ekseni etrafında dönüyor olması lazım. Hem de; sağ elin başparmağı kuzey yönüne doğru dikleştirilmişken, diğer parmaklarının işaret ettiği yönde dönmesi... Yani batıdan doğuya doğru; ki Güneş doğudan doğup batıdan batsın. Yani kuzeyden bakıldığında, Dünya saatin tersi yönde dönmeli, yörüngesinde dolaştığı gibi. Raslantı bu ya; her iki hareket için de, kuzey yönüyle ilintili olarak, sağ el kuralı geçerli. Böyle olmayabilirdi tabii ve Dünya, kuzeyden bakıldığında, Güneş'in etrafında saatin tersi yönde dolanırken, kendi etrafında saat yönünde dönüyor olabilirdi; veya tersi. O zaman; Güneş şimdiki batıdan doğup, şimdiki doğudan batardı. Ama o durumda da biz, doğuyla batıyı tersine tanımlamış olurduk herhalde: Yüzümüzü kuzeye çevirdiğimizde sol kolumuzun işaret ettiği yöne, batı yerine doğu, sağ kolumuzun işaret ettiği yöne de, doğu yerine batı demiş olurduk. Neyse, dönelim atmosfer hareketlerine...

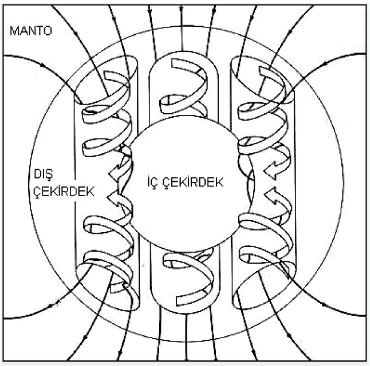
Dikkat edilecek olursa, Dünya için betimlemekte olduğumuz bu hareket düzeninde; spin ekseni, Güneş'in etrafındaki yörüngesinin, 'ekliptik' de denilen düzlemine dik. Halbuki aslında eğik... Dolayısıyla, gerçek durumla arada bir fark var ve bu yüzden, incelediğimiz durumda mevsimler oluşamayacak. E, o zaman bir önceki incelediğimiz; Güneş'in durağan bir Dünya'nın etrafında dolaştığı durumla bunun arasında ne fark var? Ekvator yine en fazla ısınacak ve genleşip yükselen hava kutuplara doğru akıp arada dibe dalarken, ekvatorda kalan alçak basınç merkezi, komşu enlemlerden gelen yüzey akıntı-



larının hücumuna uğrayacak?... Bir önceki şekilde gördüğümüz konveksiyon hücrelerinin aynısı mı oluşur? Hayır: Çünkü, bu yeni durumda spin var ve spinin, serbest uçan cisimler üzerinde etki ettirdiği, yani hava hareketlerini etkileyen sanal bir 'Coriolis kuvveti...' Ne menem şey o?

Biz yerde sabit dururken, Dünya ile birlikte dönüyor olduğumuza göre, atmosferde serbest uçuş halindeki havanın hareketinin bize nasıl göründüğünü anlayabilmemiz için; bizim gibi yere çakılı olup, Dünya ile birlikte dönen bir koordinat sistemine başvurmamız gerekir. Başlangıcı Dünya'nın merkezinde, z ekseni kuzey yönünde olsun. Sistem bu eksen etrafında, Dünya'nın sabit açısal hızıyla (**ω**) dönmektedir. Yeryüzündeki herhangi bir konumdan (r) baktığımızda, bize göre sabit bir hızla (v) hareket etmekte olan bir cisim veya molekül, gerçekte sahip olduğu yerçekimi ivmesine ek olarak, yine bize göre, hayali iki ivme bileşenine daha sahipmiş gibi görünür. Bunlardan birincisi, hayli tanışık olduğumuz ve bulunduğumuz enlemin düzleminde yatıyor olup dönme ekseninden dışarıya doğru bakan merkezkaç ivmesi (**ω**xrx**ω**), diğeri ise pek tanışık olmadığımız Coriolis ivmesidir (vx**ω**). Bu ikinci bileşenin kaynağına atfedilen hayali kuvvete 'Coriolis kuvveti' denir. Coriolis kuvveti nedeniyle, bize göre v hızıyla serbest hareket halindeki her cisim, v'nin işaret ettiği rotadan sapar; kuzey yarımkürede sağa, güneyde sola... Bunu görebilmek için; yeryüzünün çeşitli noktalarında durduğumuzu varsayarak, değişik yönlerde v hızları alıp, vx**ω**'nin o noktadaki yeryüzüne teğet olan bileşenlerine bakmak yeterlidir. Şimdi bu verilerin ışığında, hızlı bir özet: Yarımkürelerdeki akımlar birbirinin ayna simetriği olduğundan, sadece kuzey yarımküre için...

Ekvatorda ısınan hava yükselip, kuzey kutbuna doğru yönelir. Soğuyup ağırlaşmakta, yerçekiminin etkisiyle alçalmaktadır. Öte yandan, boylamlar birbirine yaklaştığından sıkışır ve 30° enlemi civarında, kısmen dalıp, kısmen de yoluna devam eder. Dalan kısım yere çarptığında, iki kısma ayrılır. Güneye yönelen kütle, ekvator civarındaki alçak basınç şeridine akacak ve birinci konveksiyon hücresinin (Hadley hücresi) kapanmasını sağlayacaktır. Kuzeye yönelen yüzey akımıysa, yine kuzeye doğru yoluna devam etmekte olan üst katmandaki akımla birlikte, ikinci bir hücre oluşturur. Bu ikinci hücre, 60°



enlemi civarında, daha soğuk olan kuzey cephesiyle buluşur. Hücreler arasındaki sıcaklık farkları, yükseklerde Jet Stream gibi hava akımlarını oluşturur. Yüksek ya da yüzeysel, tüm hava akımları, Coriolis kuvvetinin etkisiyle hep, rotalarından sağa doğru sapmaktadırlar. Dolayısıyla, sıcak yüzey rüzgârlarından, kuzeye doğru esenler sağa, yani doğuya; güneye doğru esenlerse, yine sağa, yani batıya doğru saparak, sırasıyla; kuzeydoğu ve güneybatı rüzgârlarını oluşturur. 30° enlemi civarında dalan ve 'tropik altı' (*sub-tropik*) yüksek basınç kuşağını oluşturan havanın, haftalar boyunca hız kazanamadığı olur. Eski İspanyol denizci-fetihçiler bu durumu bildiklerinden, söz konusu enleme 'At Dönencesi' derlerdi. Çünkü buralarda rüzgârsız yakalandıklarında, rüzgârın tekrar ne zaman eseceğini kestiremediklerinden ve gemideki suyu paylaşmak istemediklerinden, atlarını denize dökerlerdi. Ayrıca, sıkışırken ısınan havadaki nem oranı görece azaldığından, bu enlem kuşağı pek fazla yağış almaz. Nitekim, Sahra gibi büyük çöller bu enlem civarına denk gelmektedir. Öte yandan, kuzey yarımküredeki herhangi bir yüksek basınç merkezinden (antisiklon) dışarıya doğru dağılan hava, merkezden uzaklaşırken hep sağa doğru saparak, saat yönünde ıraksayan bir anafor oluşturur. Tersine, bir alçak basınç merkezine (siklon) doğru akan havaysa, merkeze doğru yaklaşırken, keza hep sağa doğru sapmakta ve saat yönünde yakınsayan bir anafora yol açmaktadır. Tıpkı, kuzey yarımkürede boşalmakta olan bir lavabodaki suyun, delikten aşağı giderken oluşturduğu anafordaki gibi. En güçlü anaforlar, Coriolis ivmesinin tümüyle yere paralel olduğu kutupta, kutuplarda yer alır.

Yüzeysel hava akımları tabii, topografyanın sunduğu girinti ve çıkıntılardan, sürtünme kuvvetlerinden ve okyanuslarla karaların sıcaklıkları arasındaki farklardan da etkilenirler. Diğer yandan, okyanus sularını kendi doğrultularında harekete zorlarlar. Örneğin Gulf Stream. Bir de spin ekseninin, aslında yörünge düzlemine dik olmayıp, 23,5° eğik olmasından kaynaklanan mevsimler var. Bunlar, işleri biraz daha karmaşıklaştırıyor.

Bunlar altatmosferde yer alan bazı fiziksel olaylar. Ama iklimin belirlenmesinde kimyasal olayların da rolü var...

SERA GAZLARI - 1

Gerçi Dünyamız, içindeki radyoaktif çekirdeklerin bozunması nedeniyle bir miktar enerji üretiyor ve hâlâ soğuma sürecinde. Fakat diğer gezegenler gibi, asıl enerji kaynağı Güneş. Güneş ışınlarının atmosferin hemen dışına ulaştırdığı 'enerji akısı'na veya 'yüzeysel güç yoğunluğu'na, yani ışınlara dik birim alandan saniyede geçen enerji miktarına 'Güneş sabiti' deniyor. Dünya'nın yörüngesinin ve dönme ekseninin yalpalarından kaynaklanan 'Milankoviç döngüleri' kapsamında değişken olan bu sabit, günden güne binde birkaç, uzun vadede daha fazla değişebilmekte. Değeri şimdilik, ince atmosferin hemen dışında I_0=1350 watt/m^2. Bu rakam yalnızca görünür ışığı değil, Güneş'ten gelen tüm frekansları içeriyor. Kesiti (πR^2) 127.400.000 km^2 olan Dünya için bu, toplam 1,74x10^{17} Watt'lık bir güneş enerjisi gücü demek.

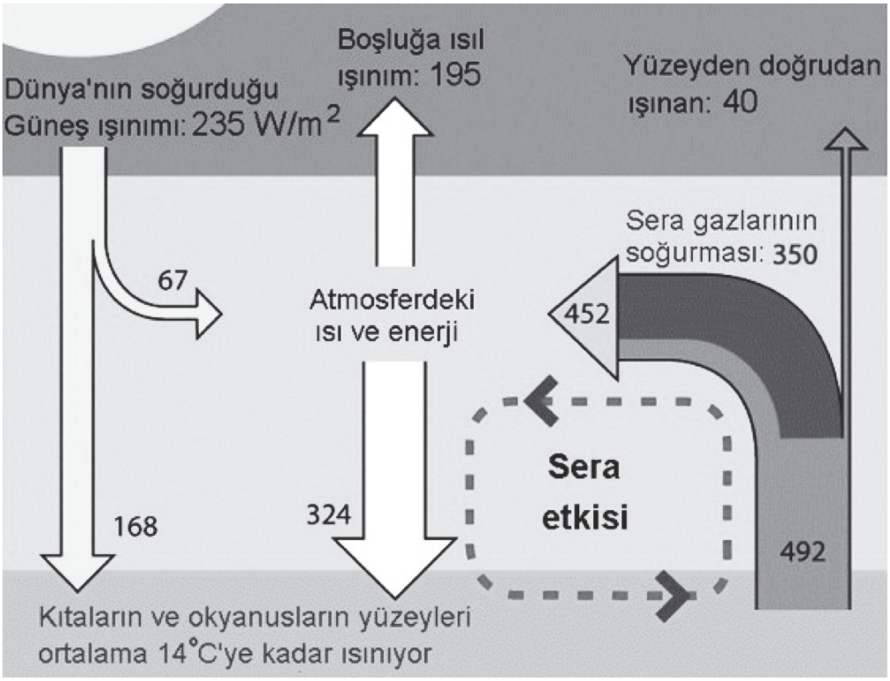
Atmosfere giren ışınlar, küre yüzeyine her yerde dik değil. Yüzeyin normaliyle, 0 ile π arasında değişen bir ϕ açısı yapıyorlar. Dolayısıyla enerji akısı, genelde $I=I_0\cos\phi$. $\cos\phi$'nin bu aralıktaki ortalama değeri 1/2. Öte yandan, Güneş gündüz var, gece yok. Bu da ek bir 1/2 çarpanı getiriyor. Farklı bir şekilde ifade edecek olursak; Dünya'nın πR^2'lik kesitinin yakaladığı enerji, ekseni etrafındaki dönmesi nedeniyle, sonuç olarak $4\pi R^2$'lik toplam yüzeyine yayılıyor. Bu yüzden, atmosfere giriş yapan ortalama enerji akısı $I_0/4$ kadar, yani 337,5 w/m^2. Bu miktara 'güneşlenme' de (*insolation*) deniyor. Işınlar ağırlıklı olarak, görünür ışık aralığında. Bir miktar da 'mor ötesi' (*ultraviyole*) bileşen içeriyorlar. Görünür ışınların enerjisi, atmosferi oluşturan gazların atomlarındaki yörünge elektronlarıyla etkileşemeyecek kadar düşük, molekül bağlarının enerji düzeylerini değiştirmek içinse fazla yüksek. Dolayısıyla bu ışınlar atmosferde soğurulmaksızın ilerleyebiliyor. Sadece yansıtılmaları ya da saçılmaları mümkün. Nitekim %6 kadarı atmosferde her daim asılı duran toz parçacıkları, %20 kadarı bulutları oluşturan su ve buz zerrecikleri, %4 kadarı da yere ulaştıktan sonra yerkabuğu tarafından gelişigüzel yönlerde saçılıyor. Toz parçacıklarının boyutu çoğunlukla 0,5 µm (mikrometre= 10^{-6}m) civarında ve parçacıklar kendi boyutlarıyla uyumlu dalgaboyuna sahip ışınları saçabilmekte.

Dolayısıyla, atmosferde ağırlıklı olarak, dalgaboyu 0,5 µm=500 nm (nanometre=10^{-9} m) civarındaki ışınlar dağınık (*diffuse*) halde. Bu dalgaboyu mavi ışığa karşılık geldiğinden, gökyüzü mavi. Aksi halde, toz parçacıkları olmasaydı, simsiyah görünürdü. Sonuç olarak; 337,5 w/m^2'lik 'güneşlenme'nin %30 kadarı 180°'lik açıyla geri yansıtıldığından, boşluğa geri kaçmakta. Geride kalan, yaklaşık 235 w/m^2. Dünya'nın ve atmosferinin soğurduğu 'Güneş ışınımı gücü' bu kadar. Bu 235 w'lık gücün, 67 w'lık morötesi ağırlıklı kısmı, yolda ozon katmanı tarafından soğuruluyor. Kalan 168 w görünür ışık aralığında. Atmosferle etkileşmeksizin yeryüzüne kadar ulaşıyor ve atmosferi değil, yeryüzünü ısıtıyor.

Isınan yeryüzü, temasta bulunduğu havayı ısıtmaktadır. Isınan hava yükselip atmosfere karışır ve yeryüzünden atmosfere 'taşınım' (*konveksiyon*) yoluyla ısı aktarır. Ayrıca, yeryüzünden buharlaşan su, buharlaşma ısısını atmosfere taşımaktadır. Yeryüzünden atmosfere bir de ışınım yoluyla enerji aktarımı var. Çünkü yeryüzü, ısınan her cisim gibi 'siyah cisim' ışımasında bulunmakta ve kısmen de atmosfere doğru, kızılaltı bölgede ışınlar yaymaktadır. Bu üç sürecin birlikte, yeryüzünden atmosfere enerji aktarım hızı 492 w/m^2. En büyük bileşen 390 w/m^2 ile kızılaltı ışıma. Bu ışınlar atmosferin büyük bir kısmını oluşturan oksijen, nitrojen ve argon molekülleriyle etkileşemezken, sera gazları tarafından güçlü bir şekilde soğurulabilmekte. Öyle ki; 390 w/m^2'nin 40'ı atmosfer ötesi boşluğa kaçarken, 350'si sera gazlarına yakalanarak atmosferin ısınmasına yol açıyor. Isınan atmosferin de siyah cisim ışıması var: 195 w/m^2'si boşluğa, 324 w/m^2'si yeryüzüne doğru. Bu dengeleri aşağıdaki şekilde görmek mümkün.

Sonuç olarak, Dünya'nın soğurduğu 235 w/m^2'lik Güneş ışınımı gücünün, 195 w/m^2'si atmosfer tarafından dolaylı olarak, 40 w/m^2'si de yeryüzü tarafından doğrudan boşluğa geri ısınmakta. Yani, gelen ve giden enerji miktarları, olması gerektiği gibi dengede. Sera etkisi diye bu döngünün; yeryüzünün toplam 492 w/m^2'lik enerji kayıp hızının, Güneş'ten yeryüzüne doğrudan ulaşan 168 w/m^2'lik görünür ışık gücü ile atmosferin yeryüzüne ışıdığı 324 w/m^2'lik kızılaltı ışınım gücünün toplamı tarafından dengelenen kısmına deniyor. Neydi 'sera gazları'?...

Bir gazı oluşturan moleküller, ışık fotonlarıyla üç farklı tür etkileşime girebilir. Birincisi, molekülü oluşturan atomların yörünge elektronlarından birinin, bir foton soğurarak, bulunduğu enerji düzeyinden bir üst enerji düzeyine geçmesi veya tersine, zaten uyarılmış

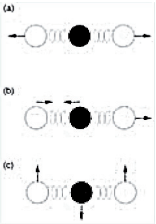

Dünya'nın soğurduğu
Güneş ışınımı: 235 W/m²
Boşluğa ısıl
ışınım: 195
Yüzeyden doğrudan
ışınan: 40
Sera gazlarının
soğurması: 350
67
Atmosferdeki
ısı ve enerji
452
Sera
etkisi
168
324
492
Kıtaların ve okyanusların yüzeyleri
ortalama 14°C'ye kadar ısınıyor

halde iken, bir foton ışıyarak, alt enerji düzeylerinden birine inmesi. Bunlara 'elektron geçişleri' diyebiliriz. Bir de, molekülü oluşturan atomların birbirlerine göre salınım veya dönme hareketleri var. Bu hareketlerin ikisi de, farklı biçim veya 'mod'lara sahip. Molekülün fotonlarla etkileşmesinin diğer iki yöntemi, bu salınım veya dönme hareketi biçimlerinden herhangi birine ait farklı enerji düzeyleri arasındaki geçişler. Elektron geçişleri, x ışınlarınınkiler düzeyinde yüksek enerjiler gerektirmekte. Dolayısıyla, kızılaltı ışınların enerji düzeyi, bu tür etkileşim için yetersiz. Dönme modları arasındaki geçişler içinse fazla yüksek. Halbuki, moleküllerin salınım modlarından birine ait farklı enerji düzeyleri arasındaki geçişlerden bazılarını uyarmak açısından uygun. Dolayısıyla, kızılaltı fotonlar ancak molekül salınımlarını uyarabilir veya salınım biçimleri arasındaki geçişler sırasında ısınabilirler.

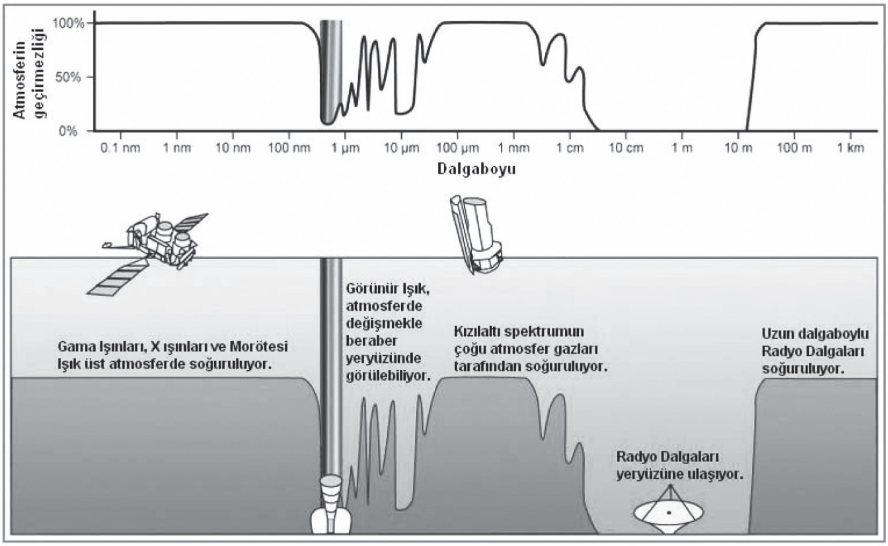
SERA GAZLARI - 2

Neden atmosferdeki bazı gazlar, örneğin karbondioksit, sera etkisi açısından önemli de, diğer bazıları değil?...

Fotonları 'taşıyan' elektromanyetik dalgaların bir salınım moduyla etkileşebilmesi için, salınım sırasında, molekülü oluşturan atomların üzerindeki yerel yük fazlalık veya eksikliklerinin, geçici olarak da olsa ayrışarak bir 'elektrik dipolü' oluşturması gerekir. Yerel yüklerin simetrisi bozulmazsa eğer, dipol oluşamıyor, etkileşme de olamıyor. Örneğin, atmosferin büyük kısmını oluşturan oksijen (0_2) ve nitrojen (N_2) molekülleri, çeşitli salınım modlarına sahipler. Fakat, elektrik dipolü oluşturamadıklarından, kızılaltı ışınlarla etkileşemez, onları soğuramazlar. Halbuki, örneğin karbondioksit, üç atomlu doğrusal bir molekül. Şekil 1'de görülen salınım modlarına sahip. Bunlardan a ve b, 'simetrik ve asimetrik doğrusal uzamalı', c ise 'bükülmeli' salınım modları. 'Simetrik doğrusal uzamalı salınım modu', yük simetrisini koruduğundan, dipol momenti oluşturamıyor. Dolayısıyla ışıkla etkileşemiyor. 'Optik etkinliği'nin olmadığı söylenir. Halbuki b) şıkkındaki 'doğrusal asimetrik uzamalı salınım modu', dipol momenti oluşturabilmesi nedeniyle optik etkinliğe sahip ve 4,26 μm dalgaboyundaki kızılaltı fotonları soğurabiliyor, ya da tersine geçişlerde ışıyabiliyor. 'Bükülmeli salınım modu'nun ise, 14,99 μm dalgaboyu civarında optik etkinliği var. Bunu görebilmek için karbondioksit dolu bir odadan, Güneş'in ışıma spektrumuna sahip bir ışın demeti geçirdiğimizi varsayalım. Bu ışıktaki uygun dalgaboyları, moleküller tarafından soğurulmakta ve bir yandan da tersine geçişler sonucunda, gelişigüzel yönlerde ısınmaktadır. Odada yansımalara yol açacak toz parçaları bulunmasın. O halde, odadaki herhangi bir foton, ya kaynaktan gelen, ya da moleküllerden biri tarafından ısınmış olan bir fotondur. Eğer ışık demetine geldiği doğrultuda bakar ve bize ulaşan ışığı tayfına ayırıp, giren ışığın tayfıyla kıyaslarsak, ilgili dalgaboyları civarındaki ışık şiddetinde ciddi azalmalar olduğunu görürüz. Bu karanlık çizgiler, 'soğurma çizgileri.' Öte yandan ışığa, geldiği doğrultudan farklı bir yönde bakarsak, yakaladığımız



Şekil 1



Şekil 2

ışığın tayfı, karbondioksitin ilgili dalgaboylarındaki ışımalarından oluşmak zorundadır. Bu birbirinden ayrı ve görece parlak çizgiler de 'ışıma spektrumu çizgileri...'

Bu çizgiler tabii, tek bir frekansa ait incecik çizgiler değil. Bunun çeşitli nedenleri var. Birincisi, molekülün salınım veya dönme modlarına ait enerji düzeylerinin, yörünge elektronlarının enerji düzeylerinde de olduğu gibi, Heisenberg'in 'belirsizlik ilkesi' gereği biraz bulanık olması. Dolayısıyla çizgiler biraz yaygın olup, sivri birer tepeye benzemekte. Buna 'spektrum çizgilerinin doğal genişlemesi' deniyor. Çizgileri genişleten ikinci bir etken, atom veya moleküllerin hareket halinde olması. Işıyan atom veya molekül, eğer bize doğru hareket ediyorsa, ışıdığı fotonun frekansı bize biraz daha yüksek, aksi halde de, yani bizden uzaklaşıyorsa, biraz daha alçak görünür. Benzer şekilde, hareket halindeki bir molekül, kendisine yaklaşan bir fotonu, fotona doğru hareket ediyorsa daha yüksek, aksi halde, yani fotondan uzaklaşıyorsa daha düşük frekanslıymış gibi görür ve fotonu ona göre, soğurabilir veya soğuramaz. Moleküllerin hareket hızları, sıcaklığa bağlı olup, belli bir dağılıma (Maxwell-Boltzmann) sahiptir. Dolayısıyla, ışıma veya soğurma spektrumu çizgileri, dar da olsa bir frekans aralığına yayılmışlardır. Isıl kökenli bu etkiye, spektrum çizgilerinin 'Doppler genişlemesi' deniyor. Çizgileri yaygınlaştıran bir diğer etken, gazın basıncı. İki nedenle: Birincisi, ışımak veya soğurmak üzere olan bir molekülün enerji düzeylerinin; yanındaki, diyelim durağan bir atom veya molekülün barındırdığı yüklerin yol açtığı elektrik alanı tarafından etkilenmesi. Dolayısıyla, ısınan veya soğurulan fotonun enerjisi, bu etkinin büyüklüğüne bağlı olarak az biraz değişebiliyor. Buna spektrum çizgilerinin 'durağan' (*quasistatic*) 'basınç genişlemesi' denmekte. İkincisi, ışıma sürecinde olan bir moleküle bir başka molekülün çarpması. Çarpışma süreci, ışıma sürecinden çok daha kısa. Sonuç olarak, ışıma süreci kesintiye uğruyor ve ısınan fotonun enerjisinde küçük bir miktar azalma oluyor. Buna da spektrum çizgilerinin 'darbe basıncı genişlemesi' denmekte.

Atmosferde sera gazı olarak karbondioksitten başka su buharı, metan ve nitrus oksit gazları var. Hatta metan, oranı düşük olmakla beraber, mol veya birim hacim başına, karbondioksitten 23 misli daha etkin bir sera gazı. Şekil 2'de atmosferin geçirmezliğinin (opaklık) dalgaboyuna göre grafiği var. Bu gazlar sayesindedir ki; belli bir frekans aralığındaki Güneş ışınlarının taşıdığı enerji, atmosfere bir kez girdikten sonra çıkamayıp, içeride hapsolmakta. Tıpkı, bir seranın üzerini kaplayan plastik örtü veya camdan giren ışınların taşıdığı enerjinin, büyük oranda içeride kalmasına benzer şekilde. Söz konusu gazlar, bu etki benzerliği nedeniyle, 'sera gazları' olarak anılıyor. Ama bu benzetme aslında yanlış. Çünkü, örneğin camdan yapılmış bir serada, içeri giren Güneş ışınları toprağı, toprak da havayı ısıtıyor. Yükselen hava ısınınca dışarı çıkamadığından, sera ısınmış oluyor. Seranın sıcaklığını korumasını sağlayan etken, kızılaltı ışınların içerde hapsolmasından ziyade, ısınan havanın dışarı çıkamaması, yani taşınımla ısı aktarımının engellenmiş olması. Nitekim, seranın tavanında ufak bir pencere açılması halinde, kızılaltı ışınların çoğunun hâlâ kaçamamasına rağmen, seranın taşınımla ısı aktarımı sonucunda hızla soğuduğu görülür. Bu durumu saptamaya yönelik bir çalışmada, kızılaltı ışınları geçiren tuz kristaliyle örtülü bir hacmin de sera gibi çalıştığı belirlendi.

Sera etkisi atmosferin gündüzleri gelen ışınlardan daha fazlasını soğurmak suretiyle daha fazla ısınmasını, geceleri de yerkabuğu ışımasını yakalayıp soğurarak, aşırı soğuyamamasını sağlamakta. Dünyamızdaki gece gündüz sıcaklıkları arasındaki fark, diğer gezegenlere oranla bu yüzden düşük. Sera etkisi gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farklarını törpülediği gibi; yıllık ortalama sıcaklığın, şimdiki 14°C'lik görece yüksek düzeyde seyrini de sağlıyor. Bu etki olmasaydı, ortalama sıcaklık 32°C azalarak -18°C'ye iner ve dünyamız buzla kaplı bir topa dönerdi. Geçmişte bu duruma yaklaşıldığı sanılıyor, 'Kartopu Dünya...' Yani sera gazlarının atmosferdeki varlığı aslında, hayatın bildiğimiz şekliyle vücut bulabilmiş olması ve benzer şekilde devamı açısından vazgeçilemez bir unsur. Ancak, etkinin gücü sera gazlarının atmosferdeki konsantrasyonlarına bağlı ve bu konsantrasyonlar değiştikçe, iklim de değişebiliyor. Nasıl?...

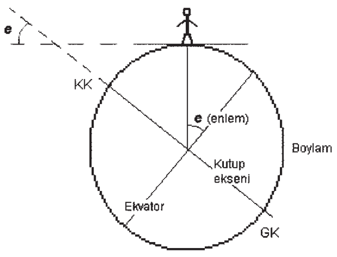
GÖKYÜZÜ - 1

Kuzey yarımküre üzerinde bir noktadayım diyelim, İstanbul'un 41° enleminde. Olduğum yerde dimdik duruyorum; başucum 'zenit', ayakucum 'nadir'. Tabii; Dünya Güneş etrafında dolanırken, kendi etrafında da dönüyor. Kuzeyden aşağıya bakılınca, iki hareket de saatin tersi yönde ve beni birlikte götürüyor. Gidiyorum gündüz gece: Gökyüzüne bakınca neler görürüm?...

Yıldızlar aslında, hatta bazıları relativistik hızlarla hareket ediyor olmalarına karşın, o kadar uzaktalar ki; en yakını Alfa Centauri 4,25 ışık yılı mesafede; bir insan ömrü boyunca kat ettikleri yerdeğiştirmeyi çıplak gözle algılamak imkânsız. Dolayısıyla, gökkürede sabit gibiler. Ama ben, hareketli bir Dünya üzerinde durduğumdan, onları hareket ediyormuş gibi görürüm: Nasıl bir düzen içerisinde?...

"Ben dönüyorum, o halde onlar bana göre hareket ediyor": Bu karmaşık bir iş. Algılarımı bana göre sabit bir başvuru sisteminde daha kolay değerlendirebildiğime göre, öyle bir eksenler sistemi istiyorum ben, vücuduma yapışık, ki hangi yıldız nerede, konumunu bir kez belirleyip, ondan sonra istediğim an, neredeyse bulabileyim: Ne yaparım?

Bulunduğum noktada, yerküreye teğet bir düzlem alırım, 'ufuk düzlemi'. Dimdik durduğuma göre, vücudumun doğrultusu yerin merkezinden geçer (Şekil 1'de görüldüğü gibi). Bu doğrultuyla ekvator düzlemi arasındaki açı enlemimdir. Kutuplar ve üzerinde bulunduğum noktadan geçen büyük daire de boylamım... Vücut doğrultum ufuk, kutup ekseni de ekvator düzlemine dik olduğuna göre; ufuk düzlemiyle kutup ekseni arasındaki dar açı, enlemime eşit olur; ya da kutup ekseni ufuk düzlemiyle, enlemim kadar bir açı yapar. Vücut doğrultumla da, enlemimin tümlerini (90°-e) tabii; eksen ekvator düzlemine dik olduğuna göre...



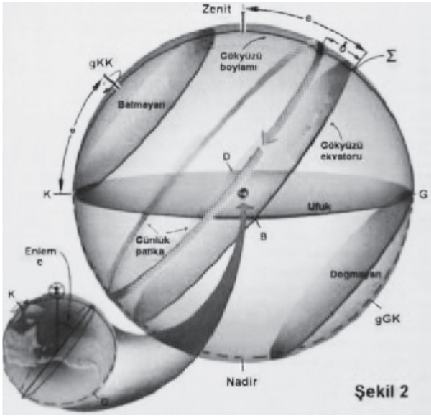
Şekil 1

Bu, yeryüzünde sabit bir başvuru sistemi, vücuduma yapışık. Yıldızlar bu sistemde nasıl konumlandırılır?

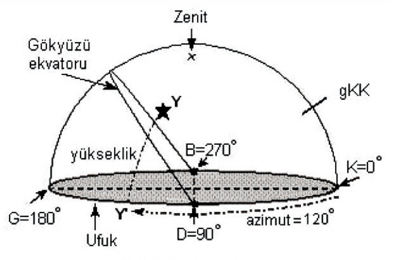
Bu soruyu yanıtlamadan önce,

başvuru sistemimin unsurlarını gökküreye taşırmam lazım. Örneğin, kutup eksenini uzatarak, gökküresel bir kutup ekseni elde ederim. Bu eksenin uçları, 'gökyüzü kuzey kutbu' (gKK) ve 'gökyüzü güney kutbu' (gGK) olur (Şekil 2'de görüldüğü gibi). Keza ufuk ve ekvator düzlemlerini alabildiğine yayarak, gökküresel birer ufuk ve ekvator düzlemi elde ederim. Ufuk düzlemimden yukarıdaki herşeyi görebilirim, altındakileri göremem. Son olarak; üzerinde bulunduğum boylam gökküreye yansıtıldığında, şekilde Σ ile gösterilen, 'gökyüzü boylamı'nı verir. Dünya, bu sistemin merkezindedir. Boyutları görece o denli küçüktür ki, bir küre olarak gösterilmesine gerek kalmamıştır. Nokta ile gösterilebilir. Bu nedenle, ufuk düzlemi aslında yeryüzüne teğet olmakla beraber, Dünya'nın yarıçapı kadar kaydırılıp, merkezinden geçirilebilir. Gökkürenin umurunda olmaz bu. Ben de kaybolurum tabii. Ama ufuk düzlemimin üzerinde, birer doğu ile batı ve kuzey ile güney yönleri vardır. Doğu ile batı, gökyüzü ekvatorunun ufuk düzlemini kestiği noktalardır. Ekvatorun görebildiğim tam yarısı, doğudan başlayıp batıda kaybolmaktadır. Kuzey ile güney ise, gökyüzü boylamımın ufuk düzlemini kestiği noktalar olup, kutup ekseninin işaret ettiği asıl doğrultularından farklıdır: Ne kadar? Eksenin ufuk düzlemimle yaptığı açı, yani enlemim kadar... Bu başvuru sistemi içerisinde her yıldız, kendisinden kutup eksenine indirilen dikmeyi yarıçap alan, yani kutup eksenine dik bir düzlemde yatan bir daire üzerinde dönüyor olur: Dünya batıdan doğuya doğru döndüğüne göre, doğudan batıya doğru. Şekil 2'deki şeritle, böyle bir 'günlük patika' gösteriliyor.

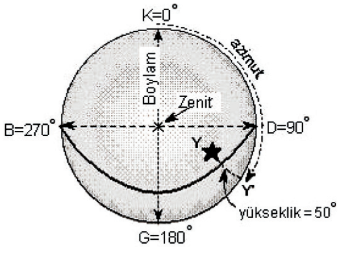
Bu küresel başvuru sisteminde herhangi bir yıldızın anlık konumunu belirlemek için, uzaklığının yanında iki açısal değere gereksinim vardır. İlk akla gelen, 'azimut-yükseklik' koordinat sistemini kullanmaktır. Bunun için, yıldızdan ve zenitten geçen büyük gökküre dairesi ufuk düzlemiyle kesiştirilir (Y′). Azimut; ufuk düzleminde kuzey yönünden başlayıp, zenitten bakıldığında saat yönünde giderek, kesişme noktasına kadar uzanan açının derece cinsinden ölçücüsüdür. Yükseklik ise; bu kesişme noktasıyla yıldızın ara-



Şekil 2



Yandan görünüş



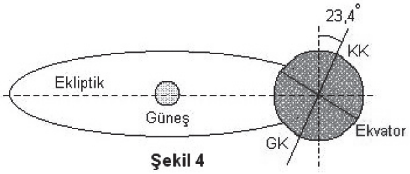
Üstten görünüş

Şekil 3

sındaki yayın, keza derece cinsinden değeri, yani yıldızın ufuk düzleminden yüksekliğidir. Şekil 3'te, azimutu 120, yüksekliği 50 derece olan bir yıldız gösteriliyor. Azimutun daha kolay gösterilebilmesi için, gökyüzü kuzey kutbu (gKK) sağ yarıda konumlandırılmış.

Bu sistemde, koordinatları verilen bir yıldızı gökyüzünde bulmak, görece kolay. Teleskopun eksenini önce yatay hale getirdikten ve doğrultusunu ufuk düzleminin kuzey yönüne çevirdikten sonra, yatayla 'yükseklik' kadar açı yapacak şekilde eğip, kuzey yönünden başlayarak doğuya doğru 'azimut' kadar döndürürsek; aradığımız yıldızı karşımızda buluruz. Ancak bu koordinatlar, hem yerküre üzerindeki konuma, hem de zamana bağlı. Çünkü ufuk düzlemi; hem yeryüzündeki farklı gözlemcilerin konumlarına göre değişiyor, hem de belli bir konumdaki aynı gözlemci için, Dünya'nın dönüşü nedeniyle, zamanla uzayda yer değiştiriyor. Dolayısıyla gözlem için, bu sistemdeki yıldız koordinatlarının; yeryüzündeki tüm noktalar için ayrı ayrı, zamana bağlı listeler (*almanac*) halinde verilmiş olması lazım: Pek pratik değil. Bir diğer seçenek, yıldızların açısal konumlarını, gökkürede sabit bazı unsurlara göre belirlemek. Ne gibi?...

Örneğin ekvator düzlemi, gökkürede sabit. O halde; açılardan birisi, yıldızdan gökkürenin merkezine indirilen yarıçapla ekvator düzlemi arasındaki açı olarak seçildiği takdirde, o da sabit olur. Gökküredeki bu açı, benim yerküredeki enlemime benzer. Ancak 'enlem' yerine, 'deklinasyon' (*declination*) olarak adlandırılır. Şekilde 2'de δ ile gösteriliyor. Anlık konumu belirleyen diğer açı, yıldızın boylamı olmak durumunda. Bu boylama sayısal değer verebilmek için, bir başlangıç boylamına gerek var. Tıpkı, yerkürede boylam belirlemek için Greenwich'ten geçirilen boylamın başlangıç alınmasında olduğu gibi. Öyle ya; yeryüzündeki herhangi bir noktanın boylamı; Greenwich'ten geçirilen boylamın ekvatorla kesiştiği noktadan başlayarak, ekvator üzerinde doğuya doğru, o noktanın boylamına kadar ölçülen açının,



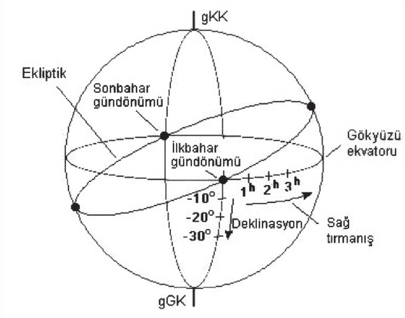
Şekil 4

derece cinsinden değeri olarak alınıyor. Yerküre üzerinde, boylamı 0 alınan sabit bir nokta var yani: Greenwich; ve Greenwich boylamının ekvatorla kesiştiği nokta da sabit. Peki, var mı böyle gökyüzü ekvatoru üzerinde sabit bir nokta; ya da böyle bir sabit noktadan geçen ve gökkürede sabit olması gereken bir başvuru boylamı?...

Dünya, kutup ekseni etrafında döndüğü gibi, Güneş'in etrafında da dolanıyor. Bu sırada kutup ekseni hep, yörünge düzlemine çıkılan dikmeyle 23,4°'lik bir açı yapıyor. Dolayısıyla, yörünge düzlemi ekvator düzlemiyle çakışmıyor ve ikisi arasında 23,4°'lik bir açı var. Yörünge düzlemine 'ekliptik düzlem', bu düzlemin gökküreyle kesişme dairesine de 'ekliptik' deniyor. O halde, gökyüzü ekvatoru ve ekliptik, gökkürede sabit iki farklı büyük dairedir. İki noktada kesişirler ve bu iki nokta da keza, gökkürede sabittir. Noktalar, 'ilkbahar ve sonbahar gündönümü' olarak adlandırılır. Bildiğimiz gibi...

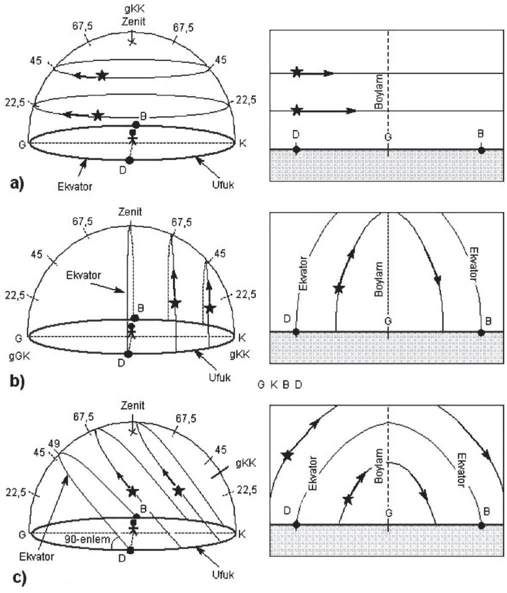
Gökyüzü ekvatoru üzerindeki bu iki sabit noktadan, 'ilkbahar gündönümü', boylam ölçümü için başvuru noktası olarak alınabilir –ki bu durumda, bir yıldızın boylamı; ilkbahar gündönümü noktasından başlayarak ekvator üzerinde doğuya doğru, derece veya saat cinsinden ölçülebilir. 360° yaklaşık 24 saatte kapsandığına göre, her 15° 1 saate eşdeğerdir. İlkbahar gündönümü noktasından doğuya doğru gidilirken ekliptik düzlem ekvatora göre tırmanışta olduğundan, gökküre boylamına 'sağ tırmanış' (*right ascension*) da denir (Şekil 5'te görüldüğü gibi). Vücuduma yapışık olan bir öncekinden farklı olarak, gökkürede sabit olan bu koordinat sisteminde, gözlemlemek istediğimiz yıldızı bulabilmek için, sağ tırmanışı ve deklinasyonu bilmek yeterlidir. Deklinasyonlar, kuzey yarımkürede pozitif, güney yarımkürede negatiftir. Yılın hangi gününde bulunduğumdan hareketle, enlemimden de yararlanarak; ilkbahar gündönümü noktasının bana göre konumunu hesaplayabilir ve verilen iki açısal koordinatını kullanarak, yıldızı gökyüzünde bulabilirim. 'Ekvator koordinat sistemi' denilen bu sistem, Dünya'nın dönme ya da kutup ekseninin yörünge düzlemine dik olmaması sayesinde var, aksi halde olmazdı. Gelelim yıldızların, kuzey yarımkürede bulunduğum enlemde, bana görünen yörüngelerine...

Demek ki yıldızlar, kendilerinden kutup eksenine indirilen dikmeleri yarıçap alan, ekvatora paralel daireler üzerinde dönüyor. O



Şekil 5

halde tüm yörüngeler ufuk düzlemimle, ekvatorun yaptığı aynı açıyı yapar: Enlemimin tümleri. Eğer kutup ekseni üzerinde, örneğin tam kuzey doğrultusunda bir yıldız varsa, yörünge yarıçapı sıfır olur ve bu yıldız bana göre, olduğu yerde durur. Örneğin, Küçük Ayı takım yıldızındaki Polaris, diğer adıyla Kutup Yıldızı, gökkürenin kutupsal eksenine çok yakın, neredeyse sabit bir yıldızdır. Deklinasyonu 89°'den biraz fazla olup, Güneş ışınlarının engellemesi haricinde, bana sürekli görünür. Kuzey kutbundan aşağı, daha düşük deklinasyonlu yıldızlara bakınca, bunların yörünge yarıçapları giderek büyür. Ancak hâlâ, ufuk düzlemimi kesemeyecek kadar küçüktürler. Bu yıldızların hepsi, bana gece gündüz görünür. 'Batmayan' veya "kutupçevresel' (*circumpolar*) yıldızlar olarak adlandırılırlar. Belli bir deklinasyon için, yörünge dairesi ufuk düzlemime dokunur. Böyle bir yörüngedeki yıldız; dokunma noktasını geçerken bir an için kaybolmakla beraber, günün hemen tamamında görünür haldedir. Bu durum, Şekil 2'de görüldüğü gibi, enlemimin tümlerine eşit olan deklinasyon için geçerlidir. Daha düşük deklinasyonlu yörüngeler, kısmen ufuk düzlemimin altında kalır. Yani, bu yörüngelerdeki yıldızlar, bana göre doğar ve batarlar. Yörüngelerinin yarıdan fazlası ufuk düzlemimin üzerinde olduğundan, günün yarıdan fazlasında görünür haldedirler. Doğup batma noktaları, ufuk düzlemimin tam doğusuyla tam batısı değildir: Doğunun kuzeyinden doğup, batının kuzeyinde batarlar. Deklinasyonlar ekvatora yaklaştıkça, görünme süreleri kısalır. Ancak hâlâ, batma sürelerinden daha uzundur. Doğma noktaları ufuk düzlemimin doğusuna, batma noktaları batısına yaklaşmaktadır. Nihayet, deklinasyon ekvatora ulaştığında, 0 deklinasyonlu bir yıldızın yörüngesi ekvatorun ta kendisi olur. Tam doğudan doğup, tam batıdan batmaktadır. Günün tam yarısına görünür, diğer yarısında kaybolur. Ekvatorun da altında, güney yarımküredeki negatif deklinasyonlar için, yıldızların görünme süreleri kısalmaya devam ederek, günün yarısından aza iner. Çünkü artık, yörüngelerinin yarıdan fazlası ufuk düzlemimin altında kalmaktadır. Doğunun güneyinden doğup, batının güneyinden batarlar. Nihayet belli bir deklinasyonun altındaki yörüngeler, tümüyle ufuk düzlemimin altın-


gKK
Zenit
67,5
67,5
45
45
22,5
22,5
B
G
K
D
a)
Ekvator
Ufuk
Boylam
D
G
B
Zenit
67,5
67,5
45
45
Ekvator
22,5
22,5
B
G
K
gGK
gKK
D
b)
Ufuk
Ekvator
Boylam
Ekvator
D
G
B
G K B D
Zenit
67,5
67,5
49
45
45
gKK
22,5
22,5
B
G
K
90-enlem
Ekvator
D
c)
Ufuk
Ekvator
Boylam
Ekvator
D
G
B

Şekil 6

da kalır. Hangi deklinasyon, hangi yıldızlar: Güney yarımkürede, mutlak değeri benim enlemimin tümlerinden daha büyük olan negatif deklinasyonlara sahip olanlar. Bu yıldızlar benim için asla 'doğmayanlar'dır.

Tekrar pahasına da olsa kısaca; yıldızların yörüngeleri; gökkürede çizilmiş, kutup eksenine dik düzlemlerde yatan, yani ekvator düzlemine paralel olan daireler şeklindedir. Dairelerin yarıçapları; kuzey kutbunda sıfırdan başlayıp, ekvatora kadar büyür ve daha sonra azalarak, güney kutbunda tekrar sıfırı bulur. Biz başımızı kaldırıp bu daireler kümesine, örneğin kuzey kutbundan baktığımızda, yörüngeler; ekvator düzlemine paralel olduklarından, buradaki ufuk düzlemimize de paraleldirler ve onu kesemezler. Dolayısıyla; günışığının engellemesi haricinde; kuzey yarımküredeki yörüngelerin hepsinin tamamını görürken, güney yarımküredekileri göremeyiz. Şekil 6a'da gösterildiği gibi, zenitimiz kuzey kutbuyla çakışmaktadır. Yörüngeler bu noktayı ortak merkez alan iç içe daireler şeklindedir. Dolayısıyla, görebildiğimiz yıldızların hepsi 'kutupçevresel'dir, bize göre asla batmaz ve yatay çizgiler üzerinde hareket ederler. Güney kutbunda durum buna benzer... Biz bu resme eğer, kuzey kutbu yerine farklı bir enlemden bakarsak, yörüngeler; ekvatora paralel olduklarından ve ekvator da ufuk düzlemimizle enlemimizin tümleri kadar bir açı yaptığından, ufuk düzlemimize enlemimizin tümleri kadar yatık görünürler. Örneğin, 0° enlemli ekvator üzerindeysek eğer, yörüngelerin hepsi; buradaki ufuk düzlemimizle, 90°-0°=90°'lik bir açı yaparlar. Yani, şeklin (b) kısmında gösterildiği gibi; ufuk düzlemimize diktirler. Yörüngelerin sadece yarılarını görürüz. Yıldızların hepsi, bize günün tam yarısı boyunca görünürler. Kuzey yarımkürenin ara enlemlerinde isek, bu paralel dairesel yıldız yörüngelerinin görebildiğimiz kısımları; şeklin

(c) kısmında gösterildiği gibidir. Sanki hâlâ kuzey kutbundaymışız da, başımızı, enlemimizin tümleri kadar sola veya hâlâ ekvatordaymışız da sağa doğru büküp, öyle bakıyormuşuz gibi...

Son olarak; yıldızların herbiri ve hepsi, ufuk düzlemimizin üzerindeki zirve yüksekliklerine, boylamımızı geçerken ulaşır ve kendi dairesini, Dünya'nın kendi ekseni etrafında dönme periyoduyla turlar. Bu periyot, bildiğimiz gece-gündüz döngüsünün periyodundan, yaklaşık bir dakika kadar daha kısadır. Birimini bu periyottan alan zamanın, 'yıldız zamanı' (*sidereal*) olduğu söylenir. Yıldızların bana görünen hareketi bu kadar. Güneş'inki daha karmaşık...

Kaynak

Kaler, J. B., *The Ever-Changing Sky*, Barney & Nobles, Mayıs 2002.

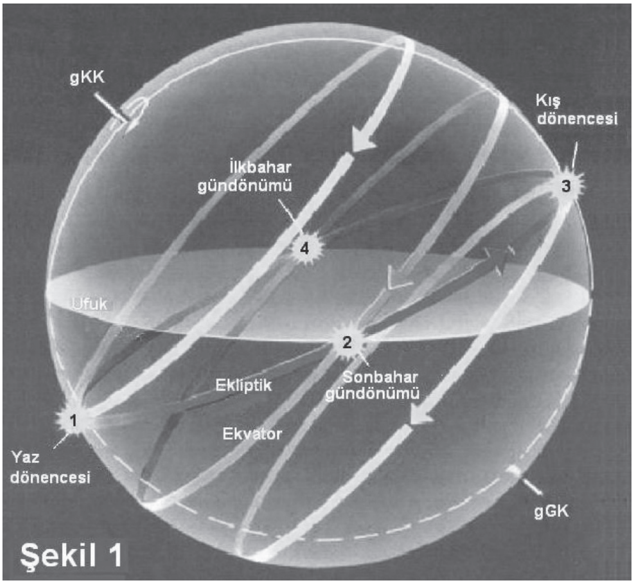
GÖKYÜZÜ - 2

Güneş de diğerleri gibi bir yıldız. Fakat, diğer yıldızların Dünya'dan gözlenen hareket düzeni oldukça basitken, Güneş'inki daha karmaşık: Niye?...

Çünkü Dünya'nın hareketinin iki bileşeni var: Güneş etrafında dolanırken, kendi etrafında da dönüyor. Diğer yıldızların Dünya'dan görünen hareket düzeninin betimlenmesinde, Güneş'e olan uzaklıklarının büyüklüğü nedeniyle, Dünya'nın Güneş etrafındaki yörünge hareketi göz ardı edilip, yalnızca kutup ekseni etrafındaki dönmesi hesaba katılırken, Güneş'in görünürdeki hareketi, Dünya'nın iki hareket bileşeninin birlikte sonucu oluyor. Nasıl?...

Önce birincisine, Güneş etrafındaki yörünge hareketine bakalım. Dünya Güneş etrafında, kuzeyden bakıldığında saatin tersi yönde dolanarak, yılda bir tur atıyor. Bu sırada kutup ekseni hep, yörünge düzlemine çıkılan dikmeyle 23,4°'lik açı yaptığından, yörünge düzlemiyle ekvator düzlemi arasında da bu kadarlık bir açı var. Yörünge hareketinin kahramanı aslında Dünya olmakla beraber; Dünya'da sabit duran birisi için, Güneş gökyüzünde, yine kuzeyden bakışa göre keza saatin tersi yönde, yılda bir tur atıyormuş görünür; her yıl gözlemlediğimiz gibi. Güneş'in gökkürede izlediği hayali patikaya 'ekliptik', onu içeren düzleme de 'ekliptik düzlem' denir. Ekliptik düzlem tabii, Dünya'nın Güneş etrafındaki yörüngesini içeren düzlemin ta kendisi. Hal böyle olunca, ekvator düzlemiyle arasında keza 23,4°'lik bir açı vardır. Konumuzla doğrudan ilgisi olmamakla beraber, bu düzlem ayrıca; Pluto ve Mars hariç, tüm diğer gezegenlerin yörüngelerini de içerir.

Şekil 1'de, gökkürenin bir çizimi veriliyor. Şekilde, kuzey yarımküredeki bir konumun ufuk düzlemi de var. Ekliptik, bir şeritle gösterilmiş. Ekvator ise başka bir şeritle. Güneş ekliptik üzerinde, kuzeyden bakıldığında saatin tersi yönde dolandığından, kuzey yarımküreden bakan birisi için de; keza saatin tersi yönde, batıdan doğuya doğru dolanmaktadır. Bu hareket yönü; burası önemli; Güneş'in doğudan batıya doğru olan görünürdeki günlük hareketinin tersi yöndedir. Yılın 365,2422 gününde, 360°'lik bir turu tamamladığına göre; Güneş ekliptik üzerinde her gün, 1°'den biraz az bir açıyla, doğuya doğru



Şekil 1

kayar. Yani, ekliptik üzerine 360 adet çentik olsaydı eğer; Güneş her günü birinin üzerinde geçirip, ertesi gün doğudaki bir sonrakine kaymış olurdu. Ancak bu arada, bir şey daha yapardı.

Dünya bir yandan Güneş etrafında dolanırken, diğer yandan da; her gün kendi etrafında, kuzeyden bakışa göre saatin tersi yönde dönüyor. Dünya'nın hareketinin bu ikinci bileşeni nedeniyle, Güneş yeryüzünde sabit birine; gökkürenin üzerinde, keza kuzeyden bakıldığında bu kez saat yönünde, yani doğudan batıya doğru dolanarak, günde bir tur atıyormuş gibi görünür. Güneş'in bu hareket bileşenini, ters yöndeki bir önceki hareket bileşeniyle birleştirdiğimizde durum şöyle...

Güneş, ekvator düzlemiyle 23,4°'lik açı yapan ekliptik yörünge üzerinde her gün yaklaşık 1'er derecelik açıyla batıdan doğuya doğru ilerlerken, bu sırada; ekvator düzlemine paralel birer daire üzerinde, doğudan batıya doğru dolanarak bir tur atıyor. Yani; ekliptik üzerindeki hayali çentiklerin her birini, kuzeyden bakışa göre saatin tersi yönde geçerken, bu sırada; o çentikten geçen ve ekvator düzlemine paralel olan bir de daire çiziyor, kuzeyden bakışa göre saat yönünde. Şekil 1'de, bu günlük patikalardan ikisi, ekvator şeridine paralel şeritler halinde gösterilmiş. Örneğin, Güneş ekliptik düzlem üzerindeki 1 numaralı nokta civarında geçirdiği gün sırasında, yaklaşık olarak; bu noktayı içerip ekvatora paralel olan dairesel şerit üzerinde, saat yönünde bir tur atıyor. Yaklaşık üç ay geçtikten ve ekliptiğin dörtte birini kat ettikten sonra, 2 numaralı noktaya ulaşıyor. Bu nokta, ekliptiğin ekvatorla kesişme noktası. Dolayısıyla, bu nokta civarında geçirdiği gün sırasında izlediği patika, yani noktayı içerip ekvatora paralel olan daire, ekvator şeridinin ta kendisi. Üç ay daha sonra, ekliptiğin dörtte birini daha kat edip, 3 numaralı noktaya ulaşmış oluyor. Bu nokta civarında geçirdiği gün sırasında izlediği patika, yani noktayı içerip ekvatora paralel olan daire, bir şeritle gösterilmiş. Nihayet, bir üç ay daha geçtikten ve ekliptiğin dörtte üçünü kat ettikten sonra, 4 numaralı noktaya ulaşıyor. Bu nokta, ekliptiğin ekvatorla diğer kesişme noktası. Dolayısıyla bu nokta civarında geçirdiği gün sırasında izlediği patika, yani noktayı içerip ekvatora paralel olan daire, ekvator şeridinin yine ta kendisi. Üç ay daha geçtikten sonra, 1 numaralı noktaya dönmüş ve yıllık döngüsünü tamamlamış oluyor.

Güneş'in gökküre üzerindeki yıllık toplam hareketini hayalde canlandırmanın bir yöntemi de şu: Gövdesi dışa doğru bombeli dev bir somun alalım ve baş kısmını kesip atalım. Somunu, ekseni gökkürenin merkezinden geçecek ve kutup ekseniyle çakışacak şekilde yerleştirmiş olalım. Öyle ki; 1 numaralı konumdaki günlük patika şeridi somunun üst, 3 numaralı konumdaki patika şeridi de alt yüzünün çeperi olsun ve somunun bombeli yan yüzeyinde, üst yüzeyinden aşağıya doğru saat yönünde dönerek inen 365/2 adet dev yiv bulunsun. Güneş'in gökküredeki, 1 numaralı konumdan başlayarak 3 numaralı konuma varana kadarki yaklaşık altı aylık hareketi; somunun üst yüzeyinin kenarından başlayıp, yivlerin üzerinden hemen hep kayarak ve fakat günde 1°'den biraz az bir açıyla da yuvarlanarak, alt yüzeyinin kenarına kadar inen bir topunkine benzer. Yani, Güneş'in gökyüzündeki görünür hareketi; 1 ile 3 noktaları arasında, sağ el kuralına göre kıvrılan, yaklaşık 365/2 turlu, bombeli bir spiral izler. 3 numaralı konumdan başlayarak 1 numaralı konuma geri dönerkenki diğer altı aylık hareketinin benzerini gerçekleştirmek için ise; hem somunu ters çevirip, hem de yivlerinin yönünü değiştirmek gerekir ki bu sefer de, 3'ten l'e kadar; sol el kuralına göre kıvrılan, aynı sayıda turlu bir spiral izlesin.

Güneş'in gökküredeki bu görünür hareket düzeni, çizdiği spiral; aslında yeryüzündeki bir gözlemcinin konumundan bağımsız. Konuma bağlı olan, bu hareket düzeninin gözlemciye nasıl göründüğü. Öyleyse; şimdi bir de kuzey yarımküredeki bir konumu alıp, bu hareket düzeninin; örneğin Şekil l'de gösterilen ufuk düzleminin ortasında duran bir gözlemciye nasıl göründüğüne bakalım.

Dikkat edilecek olursa, 4 numaralı nokta ekvatorla çakıştığından, bu konumdaki günlük patikanın yarısı ufuk düzleminin altında, yarısı üstünde kalıyor. Yani; Güneş'in ufuk düzleminin tam doğusundan doğup tam batısında battığı bu noktada, geceyle gündüz eşit. Halbuki izleyen günlerdeki patikaların yarıdan, giderek daha fazlası ufkun üstünde, azı altında. Dolayısıyla; gündüzler uzarken, geceler kısalıyor ve gündüz geceden uzun. Öte yandan, Güneş'in doğup battığı noktalar, ufuk düzleminin tam doğusuyla tam batısı değil artık: Güneş doğunun biraz kuzeyinden doğup, batının biraz kuzeyinde batıyor. Ekliptik üzerinde 1 numaralı noktaya vardığında, ekvator düzlemine göre en yüksek noktasına, yani en kuzey enlemine (deklinasyon) ulaşmış oluyor. Bu nokta, günün en uzun, gecenin en kısa olduğu nokta. Aynı zamanda Güneş'in, doğunun en fazla kuzeyinden doğup, batının en fazla kuzeyinden battığı gün. İzleyen günlerdeki patikaların, ufkun üstünde kalan kısmı, giderek azalıyor. Yani gündüzler kısalırken, geceler uzuyor. Ama gündüzler hâlâ, gecelerden uzun. Öte yandan Güneş'in doğup battığı noktalar, hâlâ ufuk düzleminin doğu ve batı noktalarının kuzeyinde olmakla beraber, onlara yaklaşıyor. 2 numaralı konuma ulaşıldığında, gece ile gündüz eşitleniyor. Çünkü ekvatorla çakışan günlük patikanın, tam yarısı ufuk düzleminin üstünde, yarısı altında. Güneş, ufuk düzleminin tam doğusundan doğup, tam batısından batıyor. İzleyen günlerdeki patikaların ise, yarıdan, giderek daha azı ufkun üzerinde, fazlası altında. Dolayısıyla, gündüzler kısalırken, geceler uzuyor. Bu arada, Güneş'in doğup battığı noktalar, ufuk düzleminin doğusuyla batısının güneyine kaymış durumda. Güneş eliptik üzerinde 3 numaralı noktaya vardığında, ekvator düzlemine göre en alçak noktasına, yani en güney enlemine inmiş oluyor. Gecenin en uzun, günün en kısa olduğu bu noktada, Güneş doğunun en fazla güneyinden doğup, batının en fazla güneyinden batıyor. İzleyen günlerdeki patikaların, ufkun üstünde kalan kısmı, giderek büyüyor. Yani gündüzler uzarken, geceler kısalıyor. Ama geceler hâlâ, gündüzlerden uzun, ta ki 1 numaralı noktaya ulaşıldığında, ikisi eşitleninceye kadar. Bu arada, Güneş'in doğup battığı noktalar, hâlâ ufuk düzleminin doğu ve batı noktalarının güneyinde olmakla beraber, onlara yaklaşıyor, ta ki 1 numaralı noktaya ulaşıldığında, onlarla çakışıncaya kadar...

Gerçi biraz tekrar oldu. Ama siz şükredin ki; ekliptik üzerinde batıdan doğuya doğru izlenen yıllık patika sırasında, doğudan batıya doğru izlenen 365 küsur günlük dairesel patikanın, her birini ayrı ayrı anlatmadım. Üzerinde durduğumuz dördü, özel konumlar.

Önemleri şuradan kaynaklanıyor...

Gece ile gündüzün eşit olduğu 2 ve 4 numaralı konumlar, gökkürede sabit olan ekvator ve ekliptik düzlemlerinin kesişme noktaları olduklarından; keza gökkürede sabit olup, yeryüzündeki bir gözlemcinin konumundan bağımsızdırlar. Yani, Dünya'daki herkes için, gece ile gündüz aynı iki günde eşitlenir. 2 numaralı konum 20 Mart civarına, 4 numaralı konum da 23 Eylül'e denk gelir. Bu iki günde geceyle gündüz Dünya'daki herkes için eşit olmakla beraber; kuzey yarımküredekiler için 21 Mart, gündüzün uzayarak geceyi, 23 Eylül ise, gecenin uzayarak gündüzü geçtiği gündür. Halbuki güney yarımküredekiler için durum bunun tersine olup; 20 Mart'ta gece uzayarak gündüzü, 23 Eylül'de de, gündüz uzayarak geceyi geçmektedir. Fakat, kuzey yarımküre alışkanlığıyla; 20 Mart'a denk gelen 2 numaralı konum 'İlkbahar Gündönümü' (*Vernal equinox*), 23 Eylül'e denk gelen 4 numaralı konum da 'Sonbahar Gündönümü' olarak adlandırılır.

Güneş'in, gökkürede sabit olan ekvator düzlemine göre en kuzey ve en güney enlemlerine (deklinasyon) ulaştığı, yani spiralin en üstündeki 1 ve en altındaki 3 noktaları, gökkürede keza sabit, dolayısıyla yeryüzündeki bir gözlemcinin konumundan keza bağımsızdırlar. 1 numaralı konum, 21 Haziran'a; 3 numaralı konum ise, 22 Aralık'a denk gelir. Bu iki günde, gece ile gündüz arasındaki fark, Dünya'daki herkes için en büyük değerine ulaşır. Ancak, kuzey yarımküredekiler için 21 Haziran gündüzün, 22 Aralık da gecenin en uzun olduğu gündür. Güneş'in, ufuk düzlemine göre öğle vaktindeki zirve yüksekliği; Haziran'da en büyük, 22 Aralık'ta da en küçük değerine ulaşır. Halbuki, güney yarımküredekiler için durum bunun tersine olup; 21 Haziran gecenin, 22 Aralık da gündüzün en uzun olduğu gündür. Güneş'in, ufuk düzlemine göre öğle vaktindeki zirve yüksekliği; 21 Haziran'da en küçük, Aralık'ta da en büyük değerine ulaşır. Fakat, kuzey yarımküre alışkanlığıyla; 21 Haziran'a denk gelen 1 numaralı konuma Yaz Dönencesi, 22 Aralık'a denk gelen 3 numaralı konuma da Kış Dönencesi denir.

Şimdi, kuzey yarımküre için hızla: Gündüzün geceye eşit ve hâlâ uzamakta olduğu 4 numaralı noktaya, ilkbahar gündönümü (*Vernal equinox*) denir ve yaklaşık olarak, 20 Mart'a denk gelir. Keza gündüzün geceye eşit ve fakat kısalmakta olduğu 2 numaralı noktaya, 'Sonbahar gündönümü' denir ve yaklaşık olarak, 23 Eylül'e denk gelir. Gündüzün en uzun olduğu 1 noktası, Yaz Dönencesi, en kısa olduğu 3 noktası ise Kış Dönencesi olarak bilinir ve sırasıyla; 21 Haziran'a ve

22 Aralık'a denk gelirler.

Bu çerçevede, bazı enlemler ilginç. Örneğin kuzey kutbunda, ufuk düzlemi ekvator düzlemiyle çakıştığından, gökkürenin kuzey yarısını görebilir, güney yarısını göremeyiz. Dolayısıyla, Güneş; 4 numaralı konumdaki ilkbahar gündönümünden başlayıp, 2 numaralı konumdaki sonbahar gündönümüne kadar izlediği patika boyunca, yani 20 Mart ile 23 Eylül arasındaki yaklaşık 6 ay süreyle, ufkun üstünde; yılın diğer altı ayı boyunca altında kalır. Yani, gece ile gündüz, altışar aydır. Gündüz başladığında, 20 Mart günü, Güneş ufuk düzleminin tam doğusundan doğar ve gün boyunca ufku turlayıp, deklinasyonu 0 olan bir daire çizer. İzleyen günlerdeki günlük patikaları da, ufuk düzlemine yaklaşık paraleldir. Ancak, günden güne yükselirler ta ki, üç ay kadar sonra, 1 numaralı konuma karşılık gelen 21 Haziran günü, Güneş en yüksek noktaya, 23,4° deklinasyonlu yaz dönencesine ulaşıp da, gündüzün ilk yarısı tamamlanıncaya kadar... Bundan sonra, Güneş'in izleyen günlerdeki günlük patikaları, ufuk düzlemine yaklaşık paralel kalmak kaydıyla, alçalmaya başlar. Bu, altı ay boyunca devam edecektir. Bu arada, ilk üç ayın sonunda, 2 numaralı konumdaki sonbahar gündönümüne karşılık gelen 23 Eylül günü geldiğinde, Güneş yine ufku turlayıp, 0 deklinasyonlu daireyi çizdikten sonra, tam batıdan batar. 6 ay sürecek olan gece başlamıştır. Günlük patikaların deklinasyonu, negatife geçmiş olup, azalmaya devam etmektedir ta ki, bir üç ay daha sonra, 3 numaralı konuma karşılık gelen 22 Aralık günü, Güneş en alçak noktaya, -23,4° deklinasyonlu kış dönencesine ulaşıp da, gecenin ilk yarısı tamamlanıncaya kadar... Bundan sonraki günlük patikalar, yine ufuk düzlemine yaklaşık paralel kalmak kaydıyla, altı ay süreyle hep yükseleceklerdir. Bu arada, ilk üç ayın sonunda, 4 numaralı konumdaki ilkbahar gündönümüne karşılık gelen 20 Mart günü geldiğinde, Güneş ufuk çizgisinin hemen altında bir tur atıp, 0 deklinasyona çok yakın bir daire çizdikten sonra, ufukta görünür. Tam doğudan doğmaktadır. 6 ay sürecek olan gündüz, tekrar başlar. Yıllık döngü tamamlanmıştır.

23,4°'nin tümleri olan, (90-23,4=) 66,6° enleminde isek; ufuk düzlemimiz ekliptiğe paralel olup, ekvatorla 23,4°'lik bir açı yapar. Dolayısıyla, Güneş'in ekvatora paralel olan günlük patikalarıyla ufuk düzlemimiz arasında hep, 23,4°'lik bir açı vardır. 1 numaralı konuma karşılık gelen 21 Haziran günü, Güneş; tabii ki ufuk çizgisinin üzerinden ve fakat ufuk düzleminin tam kuzeyinden doğar. Gün boyunca yaz dönencesini izler ve önce gökyüzünde tırmanıp, günün ortasında

23,4°'lik zirve yüksekliğine ulaştıktan sonra, tekrar alçalarak, 24. saatin sonunda, ufuk düzleminin yine tam kuzeyinden batar. Yani, 21 Haziran'da, gecenin uzunluğu sıfırdır. 3 numaralı konuma karşılık gelen 22 Aralık gününde, Güneş 24 saat boyunca kış dönencesini izler ve doğup batma noktaları ufuk düzleminin güneyiyle çakışırken, gündüzün uzunluğu sıfır olur. 4 ve 2 numaralı ilkbahar ve sonbahar gündönümlerine denk gelen 20 Mart ve 23 Eylül günlerinde ise; Güneş tam doğudan doğup tam batıdan batarken, gece gündüz eşittir.

Yok ekvator üzerindeysek eğer; ufuk düzlemimiz ekvatora, dolayısıyla da Güneş'in günlük patikalarına hep diktir. Gece ile gündüz, hep aynı ve birbirine eşit uzunluktadır. Güneş her gün tam öğlen vaktinde, zenitimizden geçer. Doğup batma yönleri, 4 numaralı konuma karşılık gelen ilkbahar gündönümünde, yani 20 Mart gününde, doğu ve batıyla çakışmaktadır. Bundan sonra; doğma yönü doğudan, batma yönü de batıdan uzaklaşarak, kuzeye doğru kaymaya başlar. 1 numaralı konuma karşılık gelen 21 Haziran'da, Güneş doğunun en fazla, yani 23,4° kuzeyinden doğup, batının en fazla, yani 23,4° kuzeyinden batar. Doğup batma yönleri bundan sonra, ters yönde kaymaya, doğu ve batıya yaklaşmaya başlar. 2 numaralı konuma karşılık gelen sonbahar gündönümünde, yani 23 Eylül gününde, Güneş yine tam doğudan doğup, tam batıdan batar. Ancak, doğup batma yönlerinin güneye doğru kayışı devam etmektedir ve Güneş bundan sonra; doğunun güneyinden doğup, batının güneyinden batmaya başlar. 3 numaralı konuma karşılık gelen 22 Aralık'ta, Güneş doğunun en fazla, yani 23,4° güneyinden doğup, batının en fazla, yani 23,4° güneyinden batar. 4 numaralı konuma ulaştığında döngü tamamlanmıştır ve Güneş, tam doğudan doğup, tam batıdan batmaktadır.

OLUŞUM

Önce, hidrojen ve helyum gazlarının karışımıyla iç içe, ince bir toz bulutu vardı. Yaşlı bir yıldızın ömrünü noktalayan süpernova patlamasının gökyüzüne yaydığı kalıntılarla zenginleşmiş bir bulutsu... 4,5 milyar yıl kadar önce yer alan "felaket"e, çekirdek birleşmelerini zorlayan güçlü kuvvet neden olmuştu. Enkazın ardından, çok daha zayıf olan kütleçekimi işe koyuldu.

Küresel kabuk şeklindeki bulutsu, kütleçekiminin etkisiyle büzüşüyor ve açısal momentumunu koruyarak, sarmal bir disk şeklini alıyordu. Kütle yoğunluğunun dağılımındaki yerel dengesizlikler nedeniyle, yer yer topaklanmalar başladı. Bunlar, yeni yıldız veya gezegenlerin nüveleriydi. Raslantı sonucu erken irileşenler öne geçiyor ve etrafındaki parçacıkları kendilerine daha güçlü bir şekilde çekerek daha hızlı büyüyorlardı. Nitekim, bazıları görece fazla irileşti. Bunlardan birisi de bildiğimiz Güneş'ti. Güçlü kütleçekimiyle civarındaki bulutsu diskini kendisine bağlamış, büzüşmesi ilerledikçe hız kazanan spininin ardından sürükleyerek etrafında dolandırmaya başlamış gibiydi. Disk dairesel şeritlere dilimlenirken, üzerinde nüvelenmeler belirdi. Güneş sistemi doğuyordu. İçten dışa doğru üçüncü gezegenimsi: Dünya... O dönemde oluşan meteorlardan bazıları günümüze kadar ulaşacak ve bunların arasında 4,55 milyar yıl yaşında olanlara rastlanacaktı.

Bu süreç, tabii açısal momentumun yanında kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamından oluşan mekanik enerjiyi de korumak zorundaydı. Dolayısıyla, topaklanma olayı bir gaz ve toz yumağının oluşmasından ibaret değildi. Çünkü parçacıklar, bulundukları uzak mesafelerden, topağın kütle merkezine doğru "bir araya düşüyor" ve, düşerken kazandıkları kinetik enerjiyle birbirlerine çarpıyorlardı. Tıpkı, gökyüzünden milyarlarca taşın yağıyor olmasında veya metal bir plakanın makineli tüfek ateşiyle taranmasında olduğu gibi. Topaklar ayrıca, dönme ve hareket hızlarındaki farklılıklardan kaynaklanan sürtünme yanında, bünyelerindeki radyoaktif bozunma nedenleriyle de ısınıyor ve fakat ancak, boşluğa ışıma yoluyla enerji aktararak soğuyabiliyordu. Eridiler ve yüzeyleri fokur fokur kaynayan kızıl kütleler haline geldiler.

Demir ve nikel gibi yoğun elementler dibe batarken, silikon benzeri hafif olanlar yüzeye çıkmıştı. Güneş gibi iri ve birim hacmi başına yüzey alanı küçük olanlar; kütleçekimsel çöküş altında daha fazla ısınıp, daha zor soğuyordu. Dolayısıyla Güneş, çekirdek kaynamalarından oluşan termonükleer süreçleri henüz başlatamamış olmakla beraber; yüksek ışıma gücüne sahip parlak bir küre haline gelmişti. Yeni doğan görece küçük yıldızların, 100 milyon yıl kadar süren 'T-Tauri' aşamasına girdi. Emdiği kütle yüzeyine çarpınca bir kısmı geri savruluyor ve etrafında, manyetik alanı tarafından yönlendirilmiş parçacık fırtınalarına yol açıyordu. Bu "güneş rüzgârları"nın etkisi yanında ışımasının güçlü basıncı, yakın gezegenlerin etrafındaki gaz katmanlarını, uzak dış yörüngelere doğru savurdu. Bundan böyle; en içteki Merkür, Venüs, Dünya, Mars; görece ağır elementlerden oluşan kayaç (*terrestial*) gezegenler olacak; Jüpiter ve Satürn gibi dış gezegenler ise ağırlıklı olarak gaz malzemesiyle kaplanacaktı. Dünya yüzeyinde atmosfer olarak, bir miktar hidrojen ve helyumla diğer bazı asal gazlar kalmıştı. Ancak; ilk atmosferi oluşturan bu gazlar ısındıkça, hafif olanların molekül hızları, yerçekiminden kaçıp kurtulmalarına yetecek kadar yüksek 'kaçış' hızlarına ulaştı. Hemen hepsi boşluğa kaçtı...

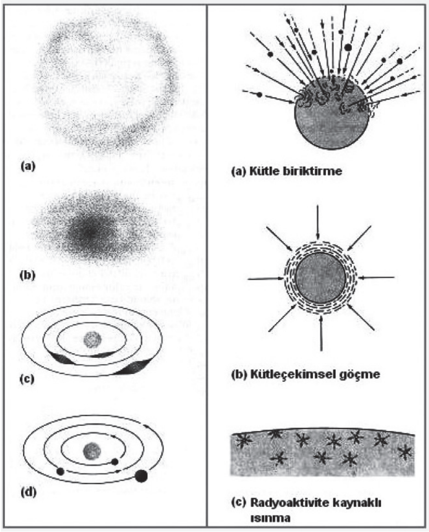
Dünya soğudukça kabuk bağlamaya başlamış; fakat bu kabuk, altındaki konveksiyon akımlarının zorlamasıyla, haşlanmış bir yumurtanınkine benzer şekilde, plakalar halinde çatlamıştı. Yüzeye tırmanan konveksiyon akımları plakaları harekete zorluyor, bazılarını birbirine yaklaştırıp, diğer bazılarını birbirinden uzaklaştırıyordu. Yaklaşma sınırlarında buluşan plakalardan, kafa kafaya gelenler birbirini kırıp geçirerek dağ silsilelerine vücut veriyor ya da biri diğerinin altına dalıp eriyordu. Uzaklaşma hatları ise alttaki magmanın yüzeye çıkıp yeni kabuk oluşturduğu bölgelerdi. Plaka tektoniği süreci çalışmaya başlamıştı ve özellikle dalma sınırları boyunca yoğun yanardağ etkinlikleri vardı.

Yanardağlar sürekli olarak; karbondioksit, su buharı, amonyak ve metan püskürttü. Yeni ve ikinci bir atmosfer oluşuyordu. Gece gündüz arasındaki sıcaklık farkları hayli yüksekti. Gündüz buharlaşan su kütleleri atmosfere karışıyor, gecenin soğuğunda yoğuşuyordu. Bu arada, Jüpiter, Dünya'nın yüzlerce (bugün 318) katı kadar bir kütleye ulaşmıştı. Güçlü kütleçekimiyle, uzak gezegencik ve kometleri etkileyebiliyor, bazılarını saptırıp Dünya'ya doğru yönlendiriyordu. Sürüyle gökcismi Dünya'ya çarptı. Kabuğunda irili ufaklı oyuklar açtı. İçerdikleri ağır bileşenler zamanla dibe çökerken, hafif olanları yüzeyde kaldı. Ayrıca, içerdikleri önemli miktarlardaki su, denizleri yükseltip okyanuslara dönüştürdü. Kabuktaki yaralar, plaka yenileme süreciyle onarılacak ve günümüze ulaşan izler bırakamayacaktı.

Oluşumundan yaklaşık 500 milyon yıl sonra, Dünya'nın etrafında Ay peydahlandı. Buna belki de, Dünya'nın yaşadığı "en büyük çarpışma olayı" yol açmıştı. Bir olasılığa göre; o zamanlar Dünya ile Jüpiter arasında bir gezegen daha vardı ve bu gezegenin yörüngesi, Jüpiter ile Güneş'in çekim kuvvetleri arasındaki bilek güreşi sonucunda kararlılığını yitirdi. Gazlardan oluşan dış katmanları Jüpiter tarafından çekilip yutulmuş, Mars'tan az daha iri olan katı çekirdeği ise, Dünya ile çarpışma rotasına oturmuştu. Çarpışma sonrasında çekirdek, bir iki ileri geri salınımdan sonra kabuktan içeri dalıp Dünya'nın merkezine doğru batarken, kabuğun görece hafif malzemesinin, Ay'ın iki misli kütleye sahip bir kısmını buharlaştırıp, gökyüzüne doğru savurdu. Buharlaşan malzemenin yarısı tekrar yeryüzüne çökmüş, diğer yarısı da zamanla yörüngede topaklaşıp Ay'ı oluşturmuştu. Kabuktaki yaraların onarımı 100 milyon yıl kadar aldı.

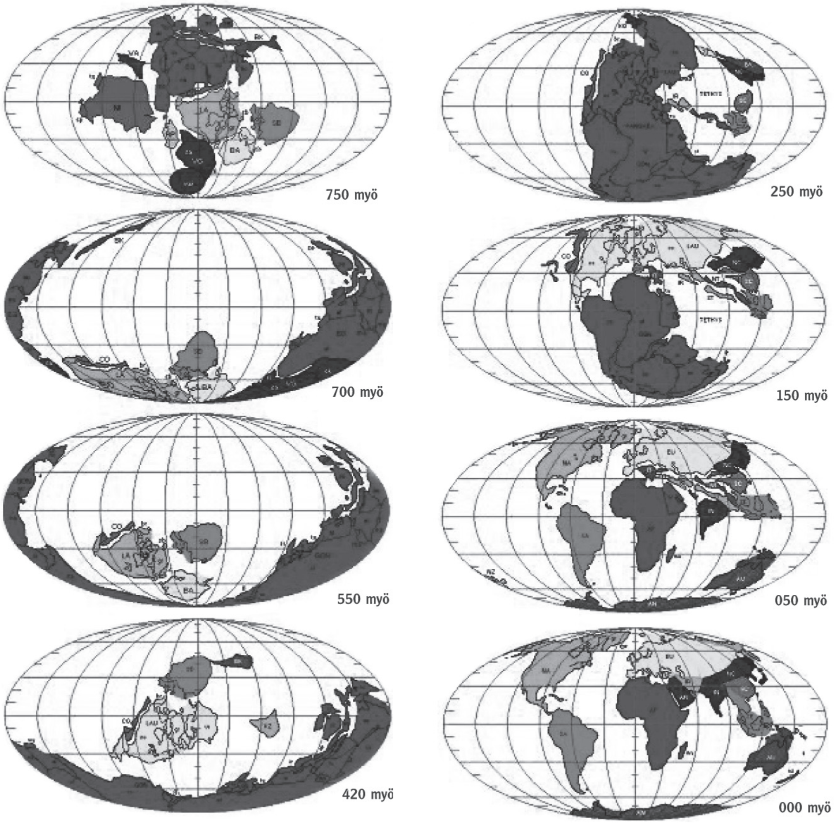
Okyanus tabanındaki ince plaka, sık volkan etkinliklerine yol açacak kadar hareketli; atmosferin bileşimi ise büyük miktarlarda amino asit oluşumuna imkân verecek kadar doğurgandı. Yıldırımlar, şimşekler, yanardağ patlamaları, hâlâ sıklıkla yeryüzüne isabet eden meteorlar; yeryüzünü dev bir laboratuvara çevirmişti. Sıcak denizlerin yüzeyi, metrelerce kalınlığında amino asit köpüğüyle kaplı bir çorba gibiydi. Bu moleküllerin gelişigüzel sentezleri, değişik protein zincirleri üretiyordu. Nihayet bir yerlerde, bir olasılıkla ısıl kaynama noktalarından birinde, kendi kendisini kopyalayabilen ilk RNA zinciri ortaya çıktı. Sol simetrik amino asitlerden oluşuyordu. Belki de, çok daha uzun deneme süreçlerinin yer almış olduğu bir başka gezegenden kopup gelen bir meteorla yeryüzüne bulaşmıştı. Sonuç olarak 3,8 milyar yıl kadar önce, sığ okyanusların, enerji ve mineral açısından zengin olan ısıl kaynama noktalarında, yaşamın ilk biçimi olan çekirdeksiz (*prokaryot*) bakteriler, *arkea*'lar ortaya çıktı. Bilinen en eski kayalar, bu "arkeyan" devrinden kalma olup, 3,75 milyar yaşındadır. Bazılarında bu bakterilerin fosilleri var.

Bu arada Güneş, termonükleer tepkimelerini çoktan başlatmış, ilk zamanlarına oranla daha parlak bir hal almaya başlamıştı. Yeryüzüne daha fazla Güneş ışını ulaşıyor ve bunlardan geri yansıyanlar, başta metan ve karbondioksit olmak üzere, o zamanki havanın bileşiminde bol miktarda bulunan sera gazları tarafından soğurulup, atmosferde bir bakıma hapsolunuyorlardı. Havayla birlikte, denizler



de ısınmaya başladı. Güneş'in ışıma gücü arttıkça sıcaklıklar yükselecek ve henüz çeşitlenememiş olan hayat, belki de sona erecekti. Apansız yakalanan hayatı bir telaştır almıştı. Ancak süregiden evrim dinamikleri sayesinde, yaklaşık 3,5 milyar yıl önce fotosentezi keşfederek, bu krizden sıyrılmayı başardı. Ortaya siyanobakteriler çıkmış, suları sarmıştı. Bu bakterilerin metabolizması, suda çözünmüş olan karbondioksiti alıp oksijen salıyordu. Oksijen suda çözünerek birikmek, sudaki azalan karbondioksit konsantrasyonu da atmosferden çekilenle telafi edilmek durumundaydı. Öte yandan, sudaki oksijen, yerkabuğundaki erozyonla okyanuslara taşınmakta olan demir karbonat ve demir sülfat gibi minerallerle tepkimeye girerek, demir oksitler üretiyordu. Dolayısıyla, okyanus diplerinde; başlangıçta oksijence fakir olan manyetit (Fe_30_4), sulardaki oksijen konsantrasyonu arttıkça da, oksijence daha zengin olan hematit (Fe_20_3) içeren katmanlar oluşmaya başladı. Bunlar "katmanlı demir tortulları" olarak günümüze kadar ulaşacaktı. Sudaki oksitlenecek mineral konsantrasyonu azaldıkça, siyanobakteriler tarafından suya verilen oksijen havaya da karışmaya başladı. Sonuç olarak atmosferdeki karbondioksit miktarı azalırken, Arkeyan devirde %1 civarında olan oksijenin miktarı, izleyen Proterozoik devirde %10'a kadar çıktı. Nitekim, bir sonraki Fanerozoik devre ait kayaçlarda, oksijence zengin hematit nedeniyle kırmızı renge sahip bulunan "kızıl yataklar"a bolca rastlanacaktı. Oksijenin bu yükselişi, arkeyalar için tam bir felaket oldu. Hemen her türlü malzemeyi "pas"landıran bu element, çoğunun ölümüne yol açtı. Geride kalanlar, oksijenin ulaşamadığı yaşam alanlarına sığındı. Halbuki oksijene dayalı yeni hayat biçimi, karmaşık yapılara doğru evrimleşiyordu. 1,8 milyar yıl önce, çekirdekli hücreler (*ökaryot*) ortaya çıktı.

Bu arada, Dünya'nın süregiden kabuk yenileme mekanizmasının zorladığı hareketlilik sayesinde; kıtalar kâh bir araya gelip bir süperkıta oluşturuyor, kâh da birbirinden uzaklaşıp dağılıyordu. Bu



döngüden, izleri günümüze kadar ulaşan en eskisi, 1,2 milyar yıl önce oluşmaya başlayan Rodinia idi. Yeryüzünün görünümüne 350 milyon yıl süreyle hâkim olacak, oluşumundan 100 milyon yıl sonra parçalanmaya başlayarak, Pantalassik Okyanus'u oluşturacaktı. 850 milyon yıl önce de Rodinia'nın hâkimiyetinin sona ermesini, izleyen 200 milyon yıl boyunca, Dünya bir dizi soğuk dönem geçirdi. Üzeri birkaç kilometre kalınlıkta buzla kaplanmıştı. "Kartopu Dünya" denilen bu dönemler arasındaki sulak dönemlerde, çok hücreli ilk organizmalar olarak algler belirdi. 540 milyon yıl önce Kambriyen Dönem'e girildiğinde, canlı türlerinin çeşitliliğinde yaşanan patlamayla birlikte, ilk hayvan grupları ortaya çıktı. 500 milyon yıl önce Ordovisyen'de balık, 420 milyon yıl önce Siluryen'de kara bitkileri vardı. 400 milyon yıl önce, atmosferdeki oksijen şimdiki düzeylerine ulaştı. 370 milyon yıl önce Devoniyen'de ilk amfibikler (hem karada hem de denizde yaşayabilen "iki yaşamlılar"), 320 milyon yıl önce Karbonifer'de ilk gerçek sürüngenler belirdi. Plakalar tekrar yaklaşmaya başlamıştı. 300 milyon yıl önce yeni bir süperkıta oluştu: Pangea.

Devir	Zaman	Dönem	Bölüm
Fanerozoik Devir (545 myö-Günümüz)	Senozoik (65,5 myö-Günümüz)	Kuaterner (1,81 myö-Günümüz)	Holosen (0,01 myö-Günümüz)
			Pleistosen (1,81-0,01 myö)
		Neojen (23,8-1,81 myö)	Pliyosen (5,32-1,81 myö)
			Miyosen (23,8-5,32 myö)
		Paleojen (65,5-23,8 myö)	Oligosen (33,7-23,8 myö)
			Eosen (55,0-33,7 myö)
			Paleosen (65,5 myö-55,0 myö)
	Mezozoik (251,4-65,5 myö)	Kretase (142-65,5 myö)	
		Jura (205,1-142 myö)	
		Trias (251,4-205,1 myö)	
	Paleozoik (545-251,4 myö)	Permiyen (292-251,4 myö)	
		Karbonifer (354-292 myö)	
		Devoniyen (417-354 myö)	
		Siluriyen (440-417 myö)	
		Ordovisyen (495-440 myö)	
		Kambriyen (545-495 myö)	
Kambriyen Öncesi (545 myö ve öncesi)	Proterozoik Devir (2500-545 myö)		
	Arkeyan Devir (3600-2500 myö)		

Geniş kıtasal yüzölçümünün iç kısımlarda yol açtığı kuraklık ve buna paralel olarak okyanuslarda yer alan iklim değişikliği, ekosistemlerde bir çöküş başlatmıştı. 250 milyon yıl önce, büyük olasılıkla bir asteroidin de isabeti, "Büyük Yokoluş"la sonuçlandı ve türlerin %90'ı ortadan kalktı. 205 milyon yıl önce Pangea parçalanmaya başlamıştı. Önce Gondwana ve Laurasia'ya ayrıldı. Kuzey Amerika ile Avrasya birbirinden uzaklaşıyor, aralarında Atlantik Okyanusu oluşuyordu. Koşullar iyileştikçe türler çeşitlenirken, en büyük canlı türlerinden dinazorlar ortaya çıktı. 100 milyon yıl önce Gondwana da kendi içinde parçalanmıştı. Kıtalar bugünkü şeklini almaya başladı. 65 milyon yıl önce keza bir meteor çarpması sonucunda gerçekleştiği düşünülen bir diğer "büyük yokoluş"un ardından, 50 milyon yıl önce memeliler belirmişti. Yaklaşık 3,5 milyon yıl önce Afrika'nın savanalarında seyrelen ağaçlardan aşağıya, hominid türlerinden birisi olan Austalopitekin'ler indi. 2 milyon yıl önce iki ayak üstünde doğrulup yürümeye, taştan yontma araçlar kullanmaya başlamışlardı. Zamanla bizlere, *Homo Sapiens*'e evrildiler. Ve nihayet 38 yıl önce, *Bilim ve*

Teknik yayın hayatına başladı...

Pardon! Konular karıştı: Daha ayrıntılı bilgi için, *Bilim ve Teknik* sitesindeki 'Jeolojik Devirler' sunumuna bakabilirsiniz: http://www.biltek.tubitak.gov.tr

Kaynaklar

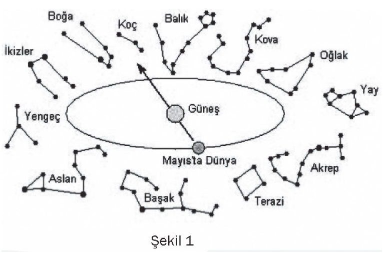
Kious, W. J., Tilling, R. I., *This Dynamic Earth: Story of Plate Tectonics*, USGS, US Government Printing Office, 1996.

http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_system#Solar_system_objects#Solar_system_objects

İZNİKLİ HİPPARKOS

Nerede kalmıştık: Güneş… Yıldızların Dünya’ya göre yalnızca günlük hareketi varken Güneş, Dünya’nın etrafındaki görünür hareketinde, doğudan batıya doğru günlük döngüsüne ek olarak, yılda bir kez de ‘ekliptik’ üzerinde, batıdan doğuya doğru bir tur dolanıyor. Dolayısıyla, görüntüsü yıl boyunca, Şekil 1’de gösterildiği gibi, geri plandaki farklı takımyıldızların üzerine düşüyor. Bu durum, yıldızların insan kaderi üzerinde etkili olduğu yönündeki eski bir inanıştan kaynaklanan burçların konusu. Öte yandan Güneş, görünürdeki hareketinin günlük döngüsü sırasında doğudan batıya doğru giderken, yıllık döngüsü nedeniyle de günde bir derece kadar doğuya kayarak gerilediğinden, ‘güneş zamanı’ ‘yıldız zamanı’ndan daha yavaş çalışıyor.

Dünya’nın dönüş (*spin*) ekseni, yörünge düzlemine (*ekliptik*) dik değil ve bu düzlemin normaliyle, yaklaşık 23,4 derecelik bir açı yapıyor. Neden böyle?… Dünya oluşurken spin açısal momentumunu bir yönde edinmiş, yörüngesel açısal momentumunu da farklı bir yönde. Toplam açısal momentum korunmak zorunda olduğundan, bugüne kadar öyle gelmiş. Ömrü boyunca uğradığı çarpışmalar nedeniyle, bu açısal momentum bileşenlerinde değişmeler olmuş tabii: Sonuç bugünkü durum. Dünya’nın veya gökkürenin kuzey kutbundan bakıldığında, Dünya kendi etrafında da, Güneş’in etrafında da aynı ve saatin tersi yönde dönüyor. Bir başka deyişle, yörünge ve spin açısal momentumları aynı yönde. Yani yörüngesinde ilerlerken ‘ileriye doğru’ dönüyor ve böyle bir yörüngeye, ‘düzgün’ (*prograde*) yörünge deniyor. Güneş bu yüzden; Dünya’dan bakıldığında doğudan doğup, batıda batıyor görünür. Halbuki Dünya kendi etrafında bir, Güneş’in etrafında da bunun tersi yönde dönüyor olabilirdi. 0 zaman yörüngesinin ‘ters’ (*retrograde*) olduğu söylenirdi. Böyle gezegenler de var: Venüs, Uranüs ve Plüton Güneş’in çevresinde, diğer gezegenler gibi saatin tersi, fakat kendi çevrelerinde saat yönünde dönüyorlar. Oralarda Güneş batıdan doğup, doğuda batıyor. “E o zaman batıya doğu, doğuya da



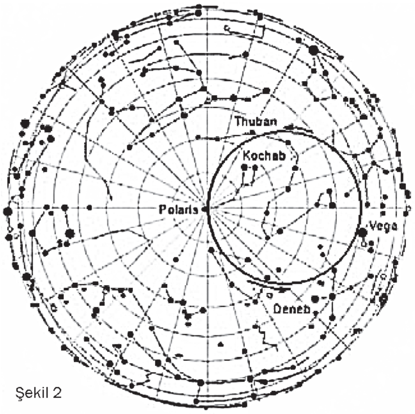
Şekil 1

batı derim" diyemezdik de. Çünkü ayaklar güneye, baş kuzeye doğru ise, batı sağ elin açıkken işaret ettiği yönde olmak zorunda. Peki: Neden gezegenlerin çoğunun yörünge açısal momentumu spiniyle aynı yönde de; azının, bu üçünün, geriye doğru?... Düzgün bir yörünge ters yörüngeden daha kararlıdır da ondan; böyle yörüngelerin oluştuktan sonra, varlıklarını sürdürmeleri olasılığı daha yüksek...

Dünya'nın hareketi, aslında bu kadar basit değil. Çünkü, Güneş'in ve diğer gezegenlerin etkisi bir yana, bir de Ay'ı var: Yarıçapı 3.474,8 km, kütlesi 7,349x10^{22} kg. Aralarındaki kütleçekimi nedeniyle birbirlerinin çevresinde; Ay'ın kütlesi Dünya'nınkinden çok daha küçük, yani %1,2'si kadar olduğundan, Dünya'nın içinde kalan, ama merkeziyle çakışmayan bir 'kütle merkezi' etrafında dönüyorlar. Sonuç olarak Dünya, Ay'la el ele vermiş, yörüngesi üzerinde dolanırken, küçük bir genlikle de olsa, valse benzer bir dans ediyor. Ancak, Dünya'nın yörünge deviniminde, Ay'ın çekiminden kaynaklanan salınımlarının genliği, yörünge boyutlarına oranla gözardı edilebilecek kadar küçük olduğundan, sanki sadece Ay, Dünya çevresinde dönüyormuş gibi görünüyor. Yörüngesi daireye yakın bir elips. Yarıçapı 384.400 km. Periyodu 27 gün, 7 saat, 43,7 dakika; yaklaşık bir ay. Ay'ın Dünya etrafındaki yörüngesinin düzlemi de ekliptik düzlemle çakışmıyor. Aralarında 5 derecelik bir açı var ve Ay'ın spin vektörü, açısal momentum vektörüyle aynı açıyı yapıyor. Dolayısıyla, yörüngesi ekliptik düzlemle, ayda iki kez, karşılıklı veya zıt noktalarda kesişiyor. Eğer tam bu sırada; sivri ucu Dünya üzerindeki bir noktada bulunan ve tabanı Güneş'in bu noktadan görünen dairesel kesitinden oluşan bir koninin tam içinden geçerse, o noktadan bakanlar için 'tam Güneş tutulması'na, koniyi kısmen keserse 'parçalı Güneş tutulması'na yol açıyor. Aksi halde, söz konusu koninin dışından geçip gidiyor. Yok eğer bu sırada, Dünya'nın Güneş'e göre ters tarafındaysa, bu sefer de kendisi tutuluyor. Dünya'nın 'gölge konisi' Ay'ınkinden çok daha büyük olduğundan, bu, Güneş tutulmasının aksine yaygın olarak gözlenebilen, fakat her ikisi de, her ay düzenli olarak gözlemlediğimiz ve Ay'ın Güneş tarafından aydınlatılan kısmının farklı açılardan görüntülerinden oluşan 'ayın evreleri'nden farklı bir durum. Spin periyodu 1 gün. Dünya'nın spin periyoduna kilitlenmiş durumda. Bu yüzden hep aynı yüzünü gösteriyor bize. Dünya'nın hareketini de etkiliyor...

Öte yandan, Dünya'nın tam bir küre olmaması ve Güneş etrafındaki yörüngesinin basık bir elips olması da, Güneş'in, yıldızların ve diğer gökcisimlerinin bize görünen hareket düzenini, yavaş çalışan bir şekilde etkilemekte. Başvuru sistemi olarak bir eylemsizlik (*inertial*) sistemi alındığında, yani üzerinde net bir kuvvet ya da tork bulunmayan bir koordinat sisteminden veya böyle bir sisteme göre sabit hızla hareket eden 'eylemsizlik açısından eşdeğer' bir koordinat sisteminden bakıldığında; Dünya'nın spin ekseni sabit değil. Çünkü Güneş ve Ay, Dünya'nın ekvator bölgesindeki şişkinliği üzerinde, spin ekseninin yörünge düzlemiyle yaptığı açıyı azaltmaya çalışan bir kuvvet uygularlar. Dünya'nın, üzerine etki eden kuvvetlerin simetrisini bozan bu etkiye karşı verdiği tepki sonucunda, spin ekseni; tıpkı spin eksenine dik yönde kuvvet uygulanan bir jiroskopun veya bisiklet tekerleğinin yaptığı gibi, ya da dönerken sürtünmeye maruz kalan bir topacınkine benzer şekilde, sabit kalamayıp yalpalar: "Presesyon". Şekil 2'de, eksenin yalpalarken çizdiği daire görülüyor. Ayrıca, yalpa açısının kendi de sabit kalamıyor ve Ay'la Güneş'in, Dünya'nın ekvator şişkinliği üzerindeki çekim kuvvetinin dağılımının, ekliptik düzleme göre simetrik olmayışı, spin eksenini kâh biraz kaldırıp, kâh biraz yatırıyor. Yani yalpa açısı periyodik olarak değişiyor: Nutasyon... Yalpa hareketinin periyodu 25.729 yıl kadar. Çok frekanslı bir salınım olan nutasyonun ise ana periyodu 18,6 yıl. Bu iki hareketi birlikte, spin ekseninin ucunun, bir yandan daire çizerken, diğer yandan da bu daire üzerinde minik elipsler çizmeye çalışması olarak düşünmek mümkün.

Dönme ekseninin yalpalaması, Dünya'nın elips şeklindeki yörüngesinin, yani elipsin ana ekseninin, Güneş'in etrafında yavaşça dönmesine yol açıyor. Hareketin periyodu, yalpa periyodu, 25.729 yıl ve bu periyoda 'Büyük Yıl' (Platonik Yıl) deniyor. Döngü sırasında tabii gündönümü noktalarının gökküre üzerindeki konumları, yavaş bir şekilde de olsa, batıya doğru kayıyor. Örneğin, ilkbahar gündönümünün sağ açıklığı ve dik açıklık, her yüzyılda 1,4° kadar değişiyor. Tekrar üstüste gelmeleri için eliptik yörüngenin dönme periyodunun tamamlanması gerektiğinden, Büyük Yıl'a aynı zamanda 'gündönümü döngüsü' de (*equinox cycle*) deniyor. Bu durum belki ilk kez, MÖ 100 yılında İznikli Hipparkos tarafından, 'Kidinnu-Kalde-Babil' kayıtlarıyla kendisininkiler arasındaki farklardan hareketle keşfedildi. Ptolemi'nin *Almagest* adlı eserinde aktardığına göre, Hipparkos ayrıca 850

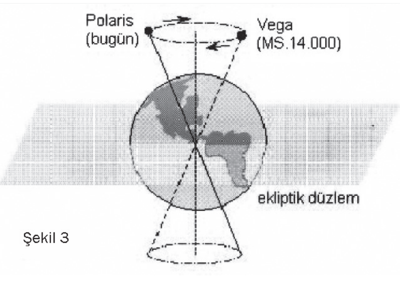


Şekil 2

kadar yıldızın konumunu 1.000 yay saniye duyarlılıkla belirleyip listelemişti. Adı, kendisinden yaklaşık 2000 yıl sonra; Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 1989 yılında fırlatılan 'astrometri uydusu'na verildi. Bu sayede çalışmalarını farklı bir kimlikle 1996 yılına kadar sürdüren Hipparkos, 1 milyondan fazla yıldızın konumunu, saniyelik yayın binde 20 ila 30'u duyarlılıkla ölçüp listeledi.

MÖ 2000 yılında, ilkbahar gündönümü Koç takımyıldızındaydı. 'Gökyüzü kuzey kutbu'na (gKK) en yakın yıldızsa, Ejderha (*Draco*) takımyıldızındaki Thuban'dı. Milat dolaylarında, ilkbahar gündönümü Balık takımyıldızına kaymışken, gKK'na en yakın yıldız Küçük Ayı (Ursa Minör) yıldızındaki 'Küçük Kepçe' (*Little Dipper*) grubunun Kochab (Evveliferka) yıldızıydı. Şimdiyse, gKK'na en yakın yıldız bizim Kutup yıldızı diye adlandırdığımız Polaris. İlkbahar gündönümü, Balık ile Kova takımyıldızlarının arasında bir yerde. MS 2600 yılında, resmen Kova takımyıldızına girmiş olacak. MS 10.000 yılında, Kuğu'nun (*Cygnus*) kuyruğundaki parlak yıldız Deneb (Zeneb-i Düccace), kutup yıldızı olacak. MS 14.000'de sıra, Çalgı (*Lyra*) takımyıldızındaki Vega'ya gelecek (bkz. Şekil 3).

Fakat başvuru sistemi olarak bir atalet sistemi değil de, Dünya'nın katı bünyesine sabitlenmiş bir koordinat sistemi kullanıldığında dahi, spin hareketinde hâlâ bir düzensizlik gözleniyor. Yerkabuğuna göre birkaç metrelik yer değiştirmelere karşılık gelen bu harekete 'kutupsal hareket' deniyor. Bu bir 'yarı periyodik' hareket: 435 günlük bir serbest salınım (Chandler yalpası) ile hava ve su kütlelerinin hareketinden kaynaklanan yıllık ortalama bir bileşenden oluşuyor. Ayrıca, Dünya'nın dönme hızı da zamanla değişiyor ve buna 'gün uzunluğunun değişimi' deniyor. Bütün bu hareketlerin Dünya'nın iklimi üzerinde periyodik etkilerinin olacağı açık. Ancak, mevsimlere yol açan ana etken, Dünya'nın dönüş ekseninin, yörünge düzlemine olan eğikliği. Çünkü yeryüzüne herhangi bir noktasında teğet olan A alanında, Güneş enerjisinin soğurulma hızı, iki şeyin çarpımına eşit: Birincisi, ışınların geliş yönüne dik yöndeki birim alandan saniyede geçen fotonların taşıdığı enerji miktarı, yani enerji akısı (ϕ). Diğeriyse soğurma yüzeyinin ışınların geliş yönüne dik olan izdüşümünün alanı ki bu, eğer A'ya çıkılan dikmenin, ışınların geliş yönüyle yaptığı açı



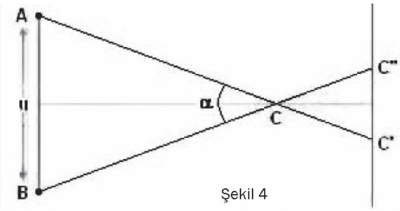
Şekil 3

α ise, $A\sin\alpha$ olur. O halde bu A alanının Güneş enerjisi soğurma hızı $q=(A\sin\alpha)\phi$'dır ve α açısı yıl boyunca değiştiğinden, Dünya Güneş'in etrafında dolaştıkça, q periyodik olarak değişip durur. Yörüngenin yarısında kuzey, diğer yarısında da güney yarımküre Güneş'e 'daha dik' bakıyor olduğundan...

Peki, Dünya ile Ay bu karmaşık hareketlerde bulunuyor da, Güneş olduğu yerde mi duruyor? Hayır. Galileo'nun 400 yıl önce Güneş lekelerini gözlemlerken fark etmiş olduğu gibi, onun da spini var. Fakat Dünya gibi katı ağırlıklı bir yapısı olmayıp gazlardan oluştuğundan, tabakaları farklı hızlarda dönüyor. Dolayısıyla spin periyodu, örneğin kutuplara yakın tabakalar için 31, ekvator civarında 27 'dünya günü.' Bu dönüşü sırasında merkezinin gezegenlerine uyguladığı çekim kuvvetleri nedeniyle, ortalama bir konum civarında, tıpkı Dünya'nın Ay etrafındaki minik genlikli valsine benzer bir dansı var. Dünya'nın yörünge elipsinin, yani elipsin ana ekseninin Güneş'in etrafında yavaşça dönüyor olması bu yüzden zaten: Büyük Yıl.

Yıldızların açısal konumlarından bahsettik de, uzaklıklarından hiç söz etmedik: Nasıl ölçülür bunlar?... Örneğin biz, yakınımızdaki bir cisme bakarken, uzaklığını kestirebiliyoruz: Nasıl?... İki gözle birden bakıyoruz da ondan. Örneğin sağ elin başparmağını kaldırıp, gözler önünde dik tutmuşken; sağ gözü kapatıp sadece sol gözle bakarsak, parmağın görüntüsü sağa; sol gözü kapatıp sadece sağ gözle bakarsak, sola kayar: Niye?... Açısal kayma bu, 'paralaks': Neden?... Gözler arasında, cismin uzaklığına oranla gözardı edilemeyecek kadar bir mesafe var da ondan. Nitekim, parmağı uzaklaştırdığımızda, kayma miktarı azalır. Hatta aynı işlemi uzak cisimler için yaparsak, hemen hiç kaymazlar, neredeyse oldukları yerde dururlar. Neden?... Gözler arasındaki mesafe, cismin uzaklığına oranla o kadar küçülmüştür ki, iki göz sanki çakışmış da aynı noktadan bakıyormuş gibidir de ondan. Uzak cisimlerin görüntüsü kaymaz, yakındakilerin kayar. Zaten, yakındaki parmağın görüntüsü de, geri plandaki sabit gibi duran cisimlere göre sağa sola kayar. Peki ne işe yarar bu, açısal kayma, paralaks?

Şekil 4'te; A ve B gözlem noktaları, C' ve C'' ise, C cisminin bu noktalardan görüntüleri. AC' ve BC'' arasında α açısı var. Açıyı ölçtük diyelim: AB uzaklığı d ise, C cisminin uzaklığı $(d/2)\sin(\alpha/2)$ olur. Cisim çok uzak ve α radyan cinsindense eğer $u=d/\alpha$. Dolayısıyla, görece yakın yıldızların uzaklığını bu yöntemle belirlemek mümkün. En yakın yıldız Güneş. Güneş'in, diyelim diskinin merkezini, Dünya'nın ekvatoru üzerindeki, merkeze göre zıt iki noktadan gözlemleyip açısal sapmasını bulabiliriz. Hatta bu iki gözlemi, ekvatordaki tek bir nokta-



Şekil 4

dan, sabah Güneş doğar ve akşam batarken de yapabiliriz; Güneş'in bu arada gökyüzünde doğuya doğru yarım derece kaydığını göz önünde bulundurmak kaydıyla... Görüntüsü oldukça büyük bir disk oluşturduğundan, Güneş için o kadar iyi bir yöntem değil bu aslında, daha duyarlı yöntemler de var. Ya diğer yıldızlar? Yöntem onlar için de geçerli: Hedef yıldızı altı ay arayla, Dünya'nın Güneş etrafındaki yörüngesinin (*ekliptik*) merkeze göre zıt iki noktasında gözlemleyip, geri plandaki çok uzak yıldızlara göre açısal kaymasını ölçmek yeterli. Ekliptiğin çapını biliyoruz, Dünya'nın Güneş'e uzaklığının iki katı; uzaklığı hesaplarız. Yöntem 200 ışık yılı mesafelere kadar çalışır. Ondan öte, açısal kaymaları ölçmek, bilinen aygıtlarla olanaksız. Ne olacak?

Her elementin kendine göre bir elektron dizilimi ve elektronlarının, farklı enerji düzeylerine sahip yörüngeler arasındaki geçişlerinden kaynaklanan özgün bir ışıma spektrumu var. Dolayısıyla, bir yıldızın toplam ışıma spektrumundaki farklı elementlere özgün frekansları arayarak, yıldızın hangi elementlerden oluştuğunu, hatta bu farklı elementlere özgün farklı frekanslardaki ışıma şiddetlerinin oranlarını alarak, yıldızın bileşimini belirlemek mümkün. Öte yandan, bileşimi bilindiği takdirde gelişmesinin hangi aşamasında olması gerektiği ve dolayısıyla büyüklüğü ve toplam ışıma şiddeti hesaplanabilen, 'Sefeid değişkeni' bazı yıldızlar var. Işıma şiddeti önceden bilinen böyle bir yıldız bize, tıpkı 100 wattlık bir sokak lambasına benzer şekilde; ne kadar yakınsa o kadar parlak, ne kadar uzaksa o kadar sönük görünür. Hal böyle olunca; benzer "Sefeid değişken" iki yıldızın parlaklıklarının oranı, uzaklıklarının oranının karesinin tersine eşittir. Elimizde eğer, uzaklığını açısal kaymayla hesaplayabildiğimiz, görece yakın bir 'Sefeid değişkeni' varsa, ki var; bu yıldızın çok daha uzaklardaki bir benzerinin uzaklığını hesaplayabiliriz. O 'Sefeid'den hareketle, daha da uzaklardaki bir başka 'Sefeid'inkini vb. Uzaklığı belirlenen yıldız, bir grup veya gökadaya aitse, o grup ya da gökadanın ortalama uzaklığı da belirlenmiş olur. Kısacası; yıldızdan yıldıza atlayarak, açısal konum gözlemleri ve uzaklık hesaplamaları sonucunda, yakın gökkürenin üç boyutlu dinamik bir haritası çıkartılabilir. Daha büyük uzaklıklar için başka yöntemler de var...

Ancak, eğer incelenen yıldız bize doğru yaklaşıyorsa, o zaman biz, yıldızdan gelen ışın dalgalarının üstüne üstüne gidiyoruz demektir. Bu durumda, dalga tepeleri arasındaki süre, yani periyot kısalmış, frekans artmış gibi görünür. Yıldız uzaklaşıyorsa eğer, bunun tersi olur ve frekans azalır. İşler karışır mı? Yoo; bir elemente ait özgün ışıma frekanslarının hepsi aynı oranda değişir, ya da kayar: 'Doppler kayması'. Elementleri tanımak, hâlâ mümkündür. Yıldız ne kadar hızlıysa kayma o kadar büyüktür. E, o zaman; işler karışmadığı gibi, frekansların kayma oranından hareketle, yıldızın hızını da hesaplamak mümkün. Peki sonuçlar?...

Güneş'in Dünya'dan uzaklığı, bunu şuradan hatırlamak mümkün: Güneş ışınları dünyamıza 8 dakikada geldiğine ve ışığın boşluktaki hızı 300.000 km/s olduğuna göre, R=8x60x300.000, yaklaşık 150 milyon km. Güneş, gökadamızdaki yaklaşık 200 milyar yıldızın görece büyüklerinden biri. Gökadanın merkezine olan uzaklığı 27.700 ışık yılı. Bu merkez etrafında, gökadayla birlikte, neredeyse dairesel bir yörünge üzerinde dönüyor ve tabii gezegenlerini de beraberinde götürüyor. Yörünge hızı 220 km/s, periyodu 226 milyon yıl. Samanyolu, 30 kadar yakın gökadanın oluşturduğu "yerel küme"ye ait. Andromeda Gökadası ile birlikte, bu kümenin hâkimi. Yerel küme, "Virgo süperkümesi" de denen "yerel süperküme"ye ait olup, bu süperküme içinde 40 km/s hızla hareket ediyor. Süperkümenin boşluktaki hızı, 600 km/s kadar. Sahi... Geceleri biz yatağımızda uyurken hangi hızla hareket ediyoruz?...

Dünya'nın yarıçapı R_D=6.370 km, çeperi $2\pi R_D$=40.000 km. Spin periyodu 24 saat olduğuna göre, ekvatordaki sabit bir nokta, Dünya'nın merkezi etrafında, 40.000/24=1.668 km/saat hızla hareket ediyor. Diğer enlemlerde bu hız, dönme yarıçapı küçüldüğünden, daha düşük. Örneğin Ankara'nın yaklaşık 40° enleminde, 1.668xcos(40°)= 1.278 km/saat. Bu bir şey değil: Bir de Dünya'nın yörünge hızı var. Yörünge yarıçapı R_Y=150.000.000, çeperi $2\pi R_Y$=940.000.000 km kadar. Periyot 365 gün = 8.760 saat olduğuna göre; yörünge hızı 107.000 km/saat. İki hız, gündönümlerinde aynı doğrultudalar ve dolayısıyla üstüste binerler. Bu toplam hızın, Güneş Sistemi'nin gökada merkezine göre 220 km/s'lik hızına paralel olduğu anlar var. Keza Samanyolu'nun Yerel Küme içindeki 40 km/s'lik hızına ve Yerel Küme'yi beraberinde sürükleyen Virgo Süperkümesi'nin boşluktaki 600 km/s'lik hızına paralel olduğu anlar da... Hepsini km/saat'e çevirip toplarsak eğer: 1.278+107.000+(220x3.600)+ (40x3.600)+(600x3.600) = 3.996.278 km/saat. Yani yaklaşık olarak, 4 milyon km/saat: "Gidiyoruz gündüz gece." Peki biz bu hızı niye hissetmiyoruz?... Madde hıza karşı tepki vermez de ondan, maddenin derdi.

ZAMANIN DENKLEMİ

Zaman... ‘Tik tak, tik tak...’ Garip bir şey, akıp gittiği hissi var; hüzün veriyor. Değerli bir şey tabii, hayattan gidiyor; nasıl ölçerim bunu?... Eski Sümer veya Mısır dönemindeyim diyelim, zamanı nasıl ölçerim? Pek öyle somut bir şey de değil, sanki histen ibaret... ‘Tik tak’... Periyodik bir hareket, düzenli periyodik bir hareket bulur, onun ‘tik taklarını sayarım. Eski Sümer zamanı, Fırat’ın kenarı; ‘tik tak’ı nereden bulacağım?... E, ‘tik tak’ olmazsa, ‘ying yang’ var, hayatımız döngülerle dolu; gece gündüz, yaz kış; onları kullanırım. Örneğin Güneş her sabah doğup akşam batıyor, oldukça düzenli olarak. Yere bir çubuk çakıp bakarım, gölgesinin boyuna. Öğlene kadar kısalır, akşama kadar uzar; güneş saati olur bu. Ya da çubuğu ekvator düzlemine dik tutarım; o zaman Güneş hep etrafında dolanır çubuğun, ben de gölgenin uzunluğu yerine, açısına bakarım... O daha düzenli değişir. Çünkü Güneş, gün boyunca gökküre üzerinde ekvatora paralel bir daire üzerinde dolaştığına ve bunu gün boyunca sabite yakın hızla yaptığına göre, çubuğun gölgesi sabit hızla döner. Hem de; Güneş yıl boyunca ekliptikte dolanırken ufuk düzlemime göre yükselip alçaldıkça, gölgenin boyu uzayıp kısalır. Mevsim hakkında da fikir sahibi olurum böylelikle. Çubuğun dibinden geçen doğrular üzerinde, farklı uzunluklar işaretleyip ayları, haftaları bile izlerim. Güzel... Örneğin öğle vakti gölgesini çizer, diğerlerinin açısını ondan ölçerim. Gölge bu durumda, Güneş doğudan batıya ilerlerken, batıdan doğuya döner; kuzey yarımkürede olduğum için ‘saat yönü’nde... Tevekkeli... Bizim şehir meydanlarında böyle bir saat görmedim ben, yazık. Halbuki bizi hatırlamaya sevkederdi, medeniyetin emekleme dönemlerini; basit, zahmetli, düşünce yoğun... Teknolojiyi sadece tüketiyor olmanın verdiği rehavet...

Tamam, güneş saati iyi oldu da, ya gece?... Su saati kullanırız. Bir kaba su doldurup dibine delik açarız, su aktıkça zaman ilerler. Kabın iç yan yüzeyinde yatay çentikler var, su azaldıkça birer birer ortaya çıkarlar. En son çıkan, zamanı gösterir... Suyu bir kaptan sabit hızla akıtmak zor ama. Seviyesi alçaldıkça, çıkıştaki basınç azalır, akış hızı yavaşlar. Kabın yanları eğikse, biraz daha iyi. Ya da suyu akıtmak yerine doldurmak... Doldur havuza suyu, del bir kabın dibini, bu sefer dışına yatay çentikler, koy havuza: Kap su alıp battıkça, çentiklere bakıp zamanı söylerim. Dolunca da dalsın: Kap başına bir saat, 'güneş saati'yle... Öyle ayarlarız kabın dışındaki çentikleri, deliğini, güneş saatiyle kalibre ederiz... Eski Babilliler kullanmış bunu. Grekler de geliştirmiş, 'su hırsızı' (*klepsidra*) derlermiş. Su boşa aktığı için değil de, hayattan çalıp gittiği için herhalde... Fakat, bir su saatinin düzgün adım çalışmasını sağlamak, aradan geçen 2.000 yıla karşın, hâlâ zor iş. Ama güneş saati de düzgün çalışmaz zaten. Gün boyunca çalışır da, gölgenin dönme hızı yıl boyunca değişir. Neden?... Dünya her gün kendi etrafında, kuzeyden bakıldığında saatin tersi yönde sabit hızla 360° dönerken, bir yandan da Güneş'in etrafında, keza saatin tersi yönde, yaklaşık 1° dolanıyor?... Güneş de buna karşılık Dünya'nın etrafında, doğudan batıya doğru 360° dönerken, batıdan doğuya doğru da 1° geri kaymış oluyor. Net 359°... O halde Güneş'in turunu tamamlaması için, Dünya'nın biraz daha dönmesi lazım. Evet, Dünya yılda mesela 366 kere dönecek ki, Güneş de 365 kere doğup batsın. Güneş'in hareketini yıldızlardan farklı kılan, bu ortalama 1°'lik geri kayış. Çubuğun gölgesiyle ilgisi?... Şu: 1°, ortalama bir değer, günlük değeri yıl boyunca değişiyor. İki nedenle; hem Güneş'in ekliptik boyunca hızının değişmesi, hem de ekliptiğin ekvatora eğik olması. O değişince, Dünya'dan bakan birisi için, ki çubuk da öyle biri, Güneş'in boylamlar arasındaki açısal hızı değişiyor; çubuğun gölgesi de bu değişken hızla dönüyor, ekvatora dik durduğundan... Tabii; Güneş az gecikince, turunu çabuk tamamlıyor, gün kısalıyor. Fazla gecikince de uzuyor... Gün?... Temiz bir tanımını yapmak lazım. Öğle vakti iyi bir başvuru anı, Güneş tam tepeme (*zenit*) ulaşmıyor, ama ufuk düzlemine göre en yüksek noktaya tırmanıyor: Öğleden öğleye... Olmadı, "temiz bir tanım..." O zaman; bulunduğum konumdan geçen coğrafya boylamını gökküreye yansıtıp, Dünya'nın merkezine göre yayıp, bir gökküre boylamı elde ederim: Güneş'in bu boylamdan ardışık iki geçişi arasındaki süre 'gün'dür. 'Görünür güneş günü'; 'görünür', çünkü görünürdeki... Yıl boyunca değişiyor; hepsinin ortalaması da, 'ortalama güneş günü'... Gerçi Güneş gibi iri diskli birisinin gökküredeki konumunu belirlemek pek kolay değil ama... Hem, bu biraz fazla değişti, daha sabit bir şey... Yıldız günü'. Güneş gününü değişken kılan, Dünya'nın yörünge hareketi; yıldızlarsa çok uzakta, bunu umursamazlar. Gerçi yörünge boyunca, yakın yıldızların konumunda bir miktar açısal kayma (*paralaks*) olur. Ama özellikle uzak yıldızlar, yalnızca Dünya'nın dönme hareketi nedeniyle hareket ediyor görünürler. Gökküreye yapışık gibidirler, onunla birlikte dönerler. Doğudan batıya doğru hep. Hem de hep ekvatora paralel. Basit bir hareket düzeni bu, iyi bir 'tik tak.' Özellikle de, eğer Dünya'nın dönme hızı sabitse... Tanımlayalım o zaman: Bir yıldızın gökküre boylamımızdan ardışık iki geçişi arasındaki süre bir 'gerçek yıldız günü'dür. 'Gerçek', çünkü yalancısı da var, gökbilimciler onu kullanır. Yıldızların bu ritminde, Güneş'in o değişken gecikmesi yok: Sabit bir gün, iyi. O halde; yıldızlar gökküre boylamımdan, Güneş'e göre her seferinde, ortalama 1° erken geçer. Günde yaklaşık... Ya da zaman olarak; 1 yıldız günü 1 güneş gününden, bu 1°'nin zaman eşdeğeri, (l/360)x24x60=4 dakika daha kısadır. Bir yarışın her etabında geciken koşucu, giderek gerilerde kalır. Güneş'in geri plandaki sabit yıldızlara göre konumu, yıl boyunca bu yüzden değişip, farklı takımyıldızların üstüne düşer. O halde, bir başka tür 'ortalama yıldız yılı:' Güneş'in gökküredeki konumunun geri plandaki yıldızlara göre aynı konumdan ardışık iki geçişi arasındaki süre... Peki: Dakika, saat, saniye?...

Tamam; gün 24 saat, her saat 60 dakika, her dakika 60 saniye. Sanki elimizdeki gün değil, bir daireymiş de, bölüp duruyormuşuz gibi: Ama hangi günü tercih etmeli?... Güneş günü olacak herhalde. Çünkü Güneş bize daha yakın, sıcak. Yaşam döngümüz ona bağlı, gece gündüz. Yıldızlara ise ara sıra bakıyoruz, keyfekeder, o kadar. Baksanıza, geniş yapraklı bitkilerden bazıları, gün boyunca yapraklarını döndürerek, Güneş'i izliyor. Lahanadan farklı olacak değiliz herhalde, geri kalacak... Tamam, güneş günü: Ama nasıl bulacağım bunun ortalamasını? ki mesela 86.400'üne eşitlediğime bir saniye diyeyim... Bir birim lazım bana; çünkü diyebileyim; "bakın, bu kadar zaman sonra şurada buluşalım..." Tanımlamak yetmiyor; ölçmek lazım. Nasıl ölçerim, bu tanımına göre saniyeyi; ortalama Güneş gününde 86,400 tanesi bulunan... Ölçmek de yetmiyor; bir kopyasını yapıp cebime koymalıyım, ki gerektiğinde kullanabileyim. Ya da bir başka yerde gördüğümde, "hah işte bu 1 saniyeydi" diye tanıyabileyim.

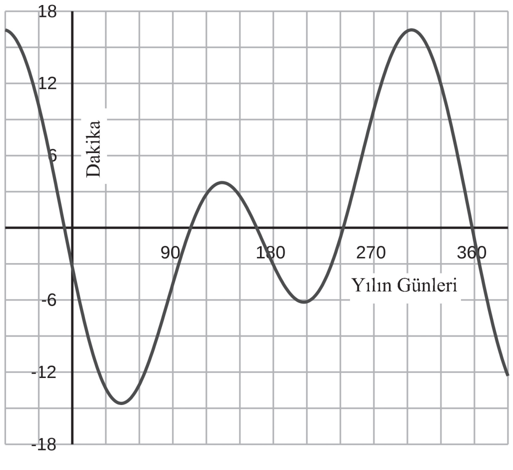
Diyelim, Ankara civarında bir konumda, kışın ortasındayız. Her nasılsa, sabit periyotla salınan bir sarkaç yaptık. Bulunduğumuz konumda yerküreye teğet olan düzlem, ufuk düzlemimizdir. Güneş ekliptiği dolanırken, ekvator düzleminden iki kez geçer. Kuzey yarımküreye tırmanırken geçtiği nokta, ilkbahar gündönümü noktasıdır. Bu günde ufuk düzlemimizin tam doğusundan doğup, tam batısından batar. İzleyen günlerde, Güneş ekliptiğin kuzey yarısındadır. Ufkumuzun tam doğusu yerine biraz kuzeyinden doğar. En kuzeyinden doğduğu gün, yaz dönencesidir. Doğma noktası bundan sonra, doğuya geri kaymaya başlar. Tekrar tam doğudan doğduğu gün, sonbahar gündönümüdür. Güneş yine ekvator düzleminden geçip, bu kez güney yarımküreye inmektedir. İzleyen günlerde, doğma noktası doğunun güneyine kayar. En güneyinden doğduğu gün, kış dönencesidir. Doğma noktası bundan sonra, tekrar doğuya doğru geri kaymaya başlar. Tekrar tam doğudan doğduğu gün, yeniden ilkbahar gündönümüdür. Güneş'in elkiptik üzerindeki bir noktadan ardışık iki geçişi arasındaki süre, bir 'tropik yıl' tamamlanmıştır. Başlangıç noktası ilkbahar gündönümü olduğundan, bu tropik yıl, bir 'ilkbahar gündönümü yılı'dır. İlkbahar gündönümünün sabahını belirleyip, öğle vaktini bekledik ve Güneş tam gökküre boylamımızdan geçerken, sarkacımızı sallayarak, salınımlarını saymaya başladık. Ta ki Güneş bu döngüyü tamamlayıncaya kadar...

Tabii Güneş, sarkacı sallamaya başladığımız ve durdurduğumuz ardışık iki ilkbahar gündönümünün sabahlarında doğarken, tam da ilkbahar gündönümü noktasında olmak zorunda değildir. Bunu doğmadan biraz önce veya doğduktan biraz sonra da yapmış olabilir. Ama, doğduğu noktanın ufuk düzlemimizin doğu yönüyle yaptığı günlük açılardan hareketle, ilkbahar gündönümü noktasından ilk ve ikinci kez tam olarak, kaç sarkaç salınımı öncesi veya sonrasında geçmiş olduğunu kestirebiliriz. Bu bize yılımızdaki gün sayısını kesirli verir. Diyelim 365,2424... Gün sayısını kesirli olması sorun değil; bilinen yıl tanımlarının hiçbirisinde tam sayıda gün yoktur zaten. Dolayısıyla saydığımız salınımların, bu kesirli güne karşılık geleni de dahil olmak üzere toplamını, yılımızdaki gün sayısına bölersek, 'ilkbahar gündönümü yılı'nın 'ortalama güneş günü' uzunluğunu, sarkacımızın salınım periyodu cinsinden bulmuş oluruz. Diyelim 86.400... Olmadı: Sarkacın uzunluğunu, denkleminden ona göre ayarlarız.

Sonra bu sarkaçla çalışan bir saat yapmış olalım. Şöyle ki; 00:00'la başlatıp çalıştırdığımızda, sarkacın 86.400'üncü salınımında 24:00'ı gösteriyor olsun. Gerçi biz saatlerimizi, gece yarısını 00:00'la gösterecek şekilde ayarlarız, ama burası önemli değil. Bu saati bir öğle vakti kurup çalıştırdık diyelim. Eğer o gün ortalama güneş gününden kısaysa, saat ertesi günün öğle vakti geldiğinde, henüz 24:00'a varmamıştır. Yani, o 'görünür güneş günü'ne göre geri kalmış olur. Saatin yavaş çalıştığı da söylenebilir. Tabii, bir sonraki gün uzamışsa daha fazla, kısalmışsa daha az geri kalır. Yok eğer o gün 'ortalama güneş günü'nden uzun idiyse, bu sefer de ertesi günün öğle vakti geldiğinde 24:00'ı aşmış olur. Yani o güneş gününe göre ileri gitmiştir. Saatin hızlı çalıştığı da söylenebilir. Tabii; bir sonraki gün uzamışsa daha az, kısalmışsa daha fazla ileri gider. Ama ortalama Güneş gününü yakalamışsak eğer, saatimiz o günü sadakatle izler ki, her tropik yılda bunlardan 4 tane vardır. Saatin gösterdiği zaman ile 'görünür güneş zamanı' arasındaki farkın yıl boyunca seyrine 'Zamanın Denklemi' denir. Aşağıdaki şekilde veriliyor.

Gerçi önce Sümer, Babil dedik, sonra da gidip sarkaçlı saat imal ettik. Halbuki ilk mekanik saat 1335 yılında Milan'da keşfedildi. Sarkaçlı saatin keşfi ise Galileo'ya (1564-1642) aitti. Ama hiç kimse, elinde bir ip ve ucunda taşla, zamanın yetkilililerinin karşısına çıkıp, "ben zamanı böyle, taşı sallayarak iyi ölçerim" dese, inandırıcı olamazdı. O da, ne kadar dil döktüyse, kent yetkililerini bu fikrin çalışacağına ikna edemedi. Dolayısıyla, ilk sarkaçlı saati Hollandalı Christian Huygens (1629-1695) 1656 yılında yaptı. Başlangıçta 1 dakika olan günlük hata payını, daha sonraki iyileştirmelerle 10 saniyenin altına (10^{-4}) indirmeyi de başardı. Buna karşın, zamanı ölçmek için 18. yüzyıla kadar, güneş ve su saatleri kullanıldı.

Neyse, biz dönelim Sümer'e, Eski Mısır'a: Onlar ne yapmış duyarlı zaman ölçümü için? Gökcisimlerini izlemişler. Nasıl? Ufuk düzlemimden dikine yukarıya doğru bakıyorum diyelim: Belli bir yıldız, boylamdan geçtiğinde saat 00:00, tekrar geçtiğinde 24:00. Bu kadar basit. Bir 'gerçek yıldız günü' oluyor bu. 'Güneş günü'nden kısa, saniyesi de öyle, ama olsun. Tanıdık bir yıldız olması lazım tabii, hep aynı yıldız... Boynumuz ağrıyacak, ama fena bir yöntem değil. Çünkü yıldız sabit hızla, 24 saatte 360° döndüğüne göre, saatte 15° döner. Yani gökküre boylamımdan geçtikten iki saat sonra, boylamımla batıya doğru yaptığı açı 2x15°, t saat sonra da tx15°. Batıya doğru açı tabii yıldız batıya doğru gidiyor... O zaman ben bu açıyı 'saat' ile ölçerim: '1 saatlik açı'=15°. Buna 'saat açısı' diyelim: 15°='1 saat açısı.' İletkinin üzerinde her 15°'ye bir çizgi işaretlerim. Araları birer saat olur. Hatta onların her birini altmışar eşit parçaya bölerim, dakika olur. Dakikaları da altmışa böl, saniye... Bu iletkiyle, o tanıdık yıldızın gökkure boylamımla yaptığı açıyı,



batıya doğru ölçtüğümde; 3 tane büyük, 20 tane küçük, 30 da minik çizgi saydıysam... saat 03:20’30”... Yıldız batı yerine doğudaysa, yani boylamı henüz geçmemişse; o zaman da açıyı doğuya doğru ölçüp, 360’tan çıkartırım. Pardon; saat açısını doğuya doğru ölçüp, 24’ten çıkartırım. Gece havanın açık olması gerekiyor ama, yıldızları görmezsem yapamam. Gündüzleri de görünmüyorlar zaten, Güneş yüzünden. Vazgeçip Güneş’i izlesem, o da gece yok. Hem, en iyisi yıldızlar; pırıl pırıl noktalar, temiz geçiş yapıyorlar boylamdan... O halde puslu gecelerin az olması lazım... E, en eski orijinal medeniyetler de öyle yerlerde gelişmiş zaten; pırıl pırıl gökyüzünün olduğu yerlerde. Sümer, Mısır, Hint, Çin. Kutuplarda gelişecek hali yoktu herhalde...

Güzel; zamanı belirlemek, zaman aralığı ölçmek, yıldız gözlemlemeye eşdeğer oluyor; ‘izlemek’ eşittir ‘gözlemek.’ Ya da zaman ölçmek, açı ölçmeye eşdeğer. Kadranlı saatlerde de öyle ya. Ama bir sorun var: O belli yıldızı her gece göremem, hem doğup batıyor hem de ufuk düzlemimin üstüne gündüz çıkmışsa Güneş’in parlaklığında kayboluyor... O halde bir başkası, onu göremeyince bir başkası... Ama eğer saat 00:00’ı birinin geçişine ayarlamışsam, diğeri geçtiğinde saat ne olacak? Aralarındaki boylam farklarını önceden belirlemiş olmak gerekir. Birini diğerlerinden ayırt etmek için de civarındaki yıldızların görece konumlarını, ait oldukları takımyıldızları vs bilmek... Gökyüzünün bir haritası lazım, yıldızların aralarındaki boylam açılarıyla birlikte; ki birini gördüğümüzde, başvuru yıldızının o anda nerede olması gerektiğini hesaplayıp, zamanı bulalım. Bu bilgiler insanlığın ortak bilgi hazinesinde var. Geçmiş gözlemlere dayanarak yıldız tabloları (*almanac*) hazırlanmış. Ama amatörler tarafından daha çok, zamanı belirlemek için değil, tam tersine; zamana bakıp hangi yıldızın boylam geçişi yapacağını önceden öğrenip, yıldızların kendilerini gözlemlemek için kullanılıyorlar. Gökbilimciler ise zamanı izlemek için, ilkbahar gündönümü noktasını başvuru noktası olarak kullanırlar. Çünkü ekvator ve ekliptik düzlemlerin kesişme noktası olduğundan, gökkürede yaklaşık sabit olup, o da bir yıldız gibi davranır. Gerçi hayali, ‘yalancı’ bir noktadır, doğrudan gözlemlenemez. Ama gökküre koordinatları, yani ‘sağ açıklık’ ve ‘dik açıklığı’ bilindiğinden, görünürdeki tanıdık yıldızlara bakıp, nerede olması gerektiği hesaplanabilir. Dolayısıyla, gökbilimciler için zaman; “ilkbahar gündönümünün saat açısı”dır ve gün, öğlende başlar. Buna ‘yıldız zamanı’ (*sidereal time*) denir ve zaman ölçmenin çok duyarlı bir yöntemidir. Ne kadar duyarlı?...

Salise kolu olan iyi bir mekanik saat, saniyede 60 kez salınır. Her salınımında aynı yönde %0,01'lik hata yapsa, saniyeyi %0,6 hatayla ölçer. Dolayısıyla, saniyenin ölçümündeki hata payını azaltmanın yolu; salınımların bir yandan sayısını çoğaltmak, diğer yandan kararlılığını artırıp, her birindeki hata oranını azaltmaktan geçer. 1928 yılına gelinip de, uygun biçimde imal edilmiş kuvartz kristallerinin 32.000 Hz'lik salınımlarına dayalı ilk saat yapıldığında, periyodundaki belirsizlik 10^{-4} kadardı. Hata payı 20 yılda 1 saniyeye, yani saniyenin ölçüm duyarlılığı milyarda birkaça ($3x10^{-9}$) ulaştı.

Eski Babilliler, belki nedenlerini bilmemekle beraber, zamanın denklemini biliyorlardı. Zamanı ölçmek için, gündüzleri güneş, geceleri su saatleri kullanıyor, fakat bu saatlerin gösterdiği zamanı, zamanın denkleminden yararlanıp düzelterek, 'ortalama Güneş zamanı'na ayarlıyorlardı. Dolayısıyla, Güneş'in görünür hareketini, gözlemlerine dayalı geometri hesaplamalarıyla, zamanı diğer türlü ölçebildiklerinin çok daha ötesinde büyük bir duyarlılıkla izleyebilmişlerdi. O kadar ki, bu duyarlılık düzeyi, 1950'lerde sezyum saati geliştirilip de saniye 10^{-14} hata payıyla ölçülebilir hale gelinceye kadar aşılamadı...

DÜNYA'YI GERİ İTMEK

Enerji genelde 'iş yapma yeteneği' olarak tanımlanır. İş nedir: 'Kuvvet çarpı yol'. Daha doğrusu kuvvet vektörü (F) ile kuvvetin etki noktasının konumundaki diferansiyel değişimin (dr) vektörel iç çarpımının, izlenen patika üzerinden integrali (F.dr). Ama biz bu karmaşık tanım yerine, kuvvetle hareketin aynı yönde olduğu, basit bir doğrusal harekete bakalım.

Örneğin, bir cisim yerde duruyor olsun. Ağırlık mg, aşağıya doğru, zemine dik bir kuvvet oluşturur ve zeminde bu kuvvete karşı bir tepki oluşur. Tepki kuvveti $F_{N'}$ zemine dik ve yukarı doğru olup, cismin taban alanına yayılmış bulunan aynı yöndeki dikey bir basınç dağılımının sonucudur. Basıncın büyüklüğü p, temas yüzeyinin alanı da A ile gösterilirse; $p=F_N/A=mg/A$'dır. Bu basıncı oluşturan ve yüzeylerin birbirine daha fazla yaklaşmasına engel olan kuvvet; yüzeyleri oluşturan atomların dış yörüngelerindeki elektronların arasındaki hem elektrostatik hem de 'Pauli'nin dışlama ilkesi'nden kaynaklanan 'kuantum mekaniksel' itme kuvvetleridir. Aksi halde cisim, bataklıkta bir filmiş gibi, zemine gömülürdü.

Cisme, büyüklüğünü giderek artırdığımız yatay bir F kuvveti uygulayalım. Cisim başlangıçta hareket edemez. Halbuki mg, zemine dik olduğundan, bize karşı koymamaktadır. Bize karşı koyan kuvvet, cisimle zeminin temas ettiği yüzeyler arasındaki, yatay bir kuvvettir. İki yüzey arasında bir sürtünme direnci (F_{sd}) oluşmuştur ve uyguladığımız yatay F kuvvetini dengelemektedir. Nasıl bir direnç? Doğada bilinen dört temel kuvvetten birisi olan elektromanyetik kuvvetin belirti biçimlerinden birisi. Çünkü herhangi bir malzemeyi oluşturan atom ya da moleküller, elektrik yükü açısından toplamda nötr olmakla beraber, aralarındaki elektron alışverişinin veya paylaşımının sonucu olarak, bazı yerlerinde artı, bazı yerlerinde de eksi yük fazlalıkları barındırmaktadır. Bu 'yerel' yük dengesizlikleri, atom veya moleküller arasında çekme ve itme kuvvetleri oluşturmakta, malzemeyi bir arada tutan 'molekül kuvvetleri' de zaten, bu 'elektrostatik kuvvet kalıntıları'nın toplamından oluşmaktadır. İki cisim birbiriyle temas ettirildiğinde, her birinin yapısında ayrı ayrı var olup, onları ayrı ayrı bir arada tutan elektrostatik kuvvet kalıntıları, aralarında da oluşmaya başlar. O kadar ki, temas yüzeyleri uygun niteliklere sahipse eğer, iki cisim zamanla birbirine kaynayabilir. Dönelim yerdeki cisme...

Cismin alt ve zeminin üst yüzeylerinin temas eden kısımları arasındaki yerel yüklerden, zıt işaretli olanlar birbirini çekerken, benzer işaretliler itmekte ve cismin yatay yönde harekete geçmesi için, bizim bu kuvvetlerin toplamının yatay bileşenini, yani sürtünme direncini yenmemiz gerekmektedir. Ancak biz uyguladığımız yatay F kuvvetini artırdıkça, sürtünme direnci F_{sd} artar. Çünkü, hareket ettirmeye çalıştığımız cismin alt yüzeyinde bazı esnemeler yer almakta ve iki yüzeydeki yerel yük fazlalıklarını birbirine yaklaştırıp, aralarındaki elektrostatik kuvvetlerle birlikte sürtünme direncinin büyümesine yol açmaktadır. Bu sırada sürtünme direnci, arayüzeye dik olan kuvvetlerden bağımsız olup, sadece uygulamakta olduğumuz yatay kuvvete bağlı ve hatta ona eşittir. O arttıkça büyür, ta ki uyguladığımız F kuvveti bir eşik değerini aşana kadar. Bu eşik değeri aşıldığında, cisim harekete geçecek ve günlük deneyimlerimizden bildiğimiz gibi, sürtünme direnci ansızın azalacaktır. Cismin harekete geçmesinden hemen önce uyguladığımız yatay kuvvet, daha doğrusu bu kuvvete karşı koyarak onu dengeleyen 'sürtünme direnci', F_{sd}'nin maksimum değeridir. Bu $F_{sd,maks}$ değerini, basit olarak F_s ile gösterelim. Büyüklüğü neye bağlı?

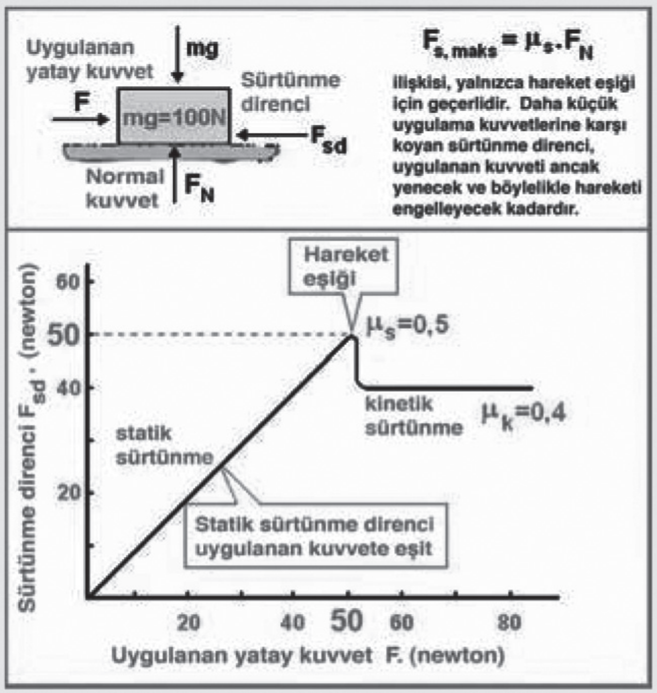
Herhangi bir andaki sürtünme direnci $F_{sd'}$ temas yüzeyinin birim alanı başına oluşan sürtünme direnci f_{sd}'nin toplamdaki sonucudur: $F_{sd}=f_{sd}.A$. Birim alan başına sürtünme direnci $f_{sd'}$ öncelikle temas eden yüzeylerdeki yerel yüklerin büyüklüğüne; bu ise yüzeyleri oluşturan atom veya moleküllerin türüne, yani yüzeylerin kimyasal bileşimine bağlıdır. Öte yandan yükler birbirine yaklaştıkça, aralarındaki kuvvetler büyüdüğünden; temas yüzeyleri arasındaki ortalama uzaklık ve üzerlerindeki girinti çıkıntılar, birim alan başına sürtünme direnci f_{sd}'nin büyüklüğünü belirleyen ikinci ana etkeni oluşturur. Örneğin temas yüzeylerinin birim alanı başına dikey kuvvet, yani dikey basınç $p=F_N/A$ ne kadar büyükse, yüzeyler birbirine o kadar yaklaşır. Bu karmaşık etkileşme şemasını, ilgili kuvvetlerin analitik ifadelerinden hareketle irdelemek zor olduğundan, sürtünme direnci veya kuvvetleri genelde, deneysel incelemelere dayalı 'empirik' yöntemle hesaplanır. Sürtünme daima iki cisim arasında yer aldığından, tek bir cisim için sürtünme katsayısı anlamsızdır. Dolayısıyla, cismin alt ve zeminin üst yüzeyini oluşturan malzemelerin cinsini belirleyerek, bir 'malzeme çifti' seçmiş olalım. İki malzeme arasındaki temas yüzeyinin birim alanı başına maksimum sürtünme direnci $f_{sd,maks}$'ın büyüklüğü, birim alan başına dikey basınç p ile doğru orantılıdır. Orantı katsayısı μ_s ile gösterilirse, $f_{sd,maks}=\mu_s.p$'dir. Bu durumda, bizi asıl ilgilendiren, temas yüzeyleri arasındaki toplam statik sürtünme kuvveti $F_s=f_{sd,maks}.A=\mu_s.p.A$ olur. Yani: $F_s=\mu_s.(F_N/A).A=\mu_s.F_N$. Sonucun ilginç tarafı, maksimum statik sürtünme kuvveti F_s'nin büyüklüğünün, temas yüzeyinin alanından bağımsız olması; yani bu açıdan, cismin ağırlığını geniş bir alana yaymakla, sivri bir ucun üzerine oturtmak arasında bir fark olmamasıdır. Öte yandan, $F_N=mg$ olduğundan, $F_s=\mu_s.mg$'dir. Sürtünme kuvvetinin bir diğer özelliği, harekete daima karşı koyması. Dönelim cisme...

Cismi harekete geçirmek için uyguladığımız yatay kuvveti artırırken, uzunca bir süre başarılı olamadığımızı varsayalım. İttire kaktı-ra nefes nefese kalmış, terlemeye başlamışızdır. Halbuki, cisim hareket etmediğine ve uyguladığımız yatay kuvvet 'yol' almadığına göre, harcadığımız 'kalori'lerin nereye gittiği sorusu doğar. Kaslarımızı oluşturan lifler, kuvvet uygularken kasılıp kısalmakta, ardından gevşeyip uzamaktadır. Herhangi bir lifi oluşturan hücreler dizisindeki ardışık üyeler, birbirleriyle kısmen çakışan yapıdadır. Örneğin bir çizgi üzerine, aralarında boşluklar bırakarak tuğlalar dizmiş, sonra da aralarındaki boşlukların üzerine birer tuğla daha yerleştirmiş olalım. Aradaki tuğlalardan herhangi birisi, komşu iki tuğlayla kısmen, alttan ya da üstten çakışmaktadır. Kas lifinin yapısı, kabaca buna benzer. Ardışık hücreler, sırasıyla bir alttan bir üsten kızaklı kayar kapaklar dizisi gibi, birbirinin üzerinden kayabilmekte olup, uçlarına periyodik olarak, zıt işaretli iyonlar pompalamaktadır. İyon yoğunlukları arttığında, uçlar birbirini çekerek hücreleri daha fazla üst üste bindirdiğinden lifin boyu kısalır. Yoğunluk azaldığında da hücreler geri kayıp uç uca geldiğinden, boy uzar. Bu sırada, iyon grupları arasındaki kuvvetlerin lif boyuna teğet olan net bileşenlerine karşı iş yapılmaktadır. Cismi itmeye çalışır ve fakat hareket ettiremezken, düz ve çizgili kas hücrelerimizde tüketilen kaloriler bu işe harcanır. Hücreler gereken enerjiyi, depolamış oldukları ATP moleküllerini parçalayarak üretmektedir. Bu işlem ek oksijen gerektirdiğinden, daha güçlü bir şekilde soluyarak, hücrelere daha fazla oksijen pompalamamız gerekir. Soluduğumuz oksijenin yetersiz kalması halinde, bu işlemi bir süre için oksijensiz olarak da sürdürebilen 'çizgili' kas hücreleri, daha fazla görev üstlenir. Yapılan işin tümü, hücre sıvılarında ısıya dönüşür. Konveksiyon yoluyla kana aktarılmakta ve sıcaklığı yükselme eğilimine giren kan, gözeneklerimizden buharlaşma yoluyla soğutulmaktadır. Terleme nedenimiz budur. İşlem sırasında oluşan ürünlerden birisi laktik asit olup, kas hücrelerinde birikmesi halinde, yorgunluk hissine yol açar. Kol kaslarımıza giden 'geril' komutlarının periyodu uzamakta, kaslar kasıldıktan sonra daha uzun süreyle gevşek kalmaktadır. Öyle ki, kolumuzu kaldırıp yere paralel tutmaya çalışsak, kol; süresi uzamış olan gevşeme sırasında kendini taşıyamayıp biraz aşağı düşecek, gerilme komutu nihayet gelip de kaslar gerildiğinde tekrar yükselecektir. Aşağı yukarı salınıp durur. Cismi itmeye çalışırken de zaten titremektedir.

Cisim nihayet harekete geçtikten sonra hem sürtünme direnci azalmış hem de uyguladığımız yatay kuvvetten bağımsız bir hal almıştır. Yatay kuvveti ne kadar artırırsak artıralım, artık hep aynı büyüklükte kalır. Cisim ivmelenerek hız kazanmaya başlamıştır. Daha fazla hızlanmasını istemiyorsak, uyguladığımız kuvveti azaltmamız gerekir. Azalttığımızı ve hızın, diyelim bir v değerine ulaştıktan sonra, sabitleştiğini varsayalım. İvme artık sıfır olduğuna göre, uyguladığımız kuvvet, sürtünme direncini tam olarak dengelemektedir. Bu, cismin hareketi sırasındaki sürtünme direncine 'kinetik sürtünme kuvveti' denir ve F_k ile gösterilir. Kinetik sürtünme kuvveti F_k da, statik sürtünme kuvveti gibi, temas yüzeyindeki birim alan başına sürtünme dirençlerinin toplamdaki sonucudur. Dolayısıyla büyüklüğünün, cismin zemine uyguladığı dikey kuvvetle orantılı olması beklenir. Orantı katsayısına 'kinetik sürtünme katsayısı' denir ve μ_k ile gösterildiğinde, kinetik sürtünme kuvveti $F_k=\mu_k F_N$ olur. Hareketin başlamasıyla birlikte sürtünme kuvveti azaldığına göre, $\mu_k<\mu_s$'dir. Azalmanın nedeni, temas yüzeylerindeki pürüzlerin, hareket nedeniyle kısmen de olsa törpülenmesidir. Tıpkı birbirine sürtülen iki zımpara arasındaki sürtünme kuvvetinin, zımparalardaki pürüzler aşındıkça azalmasında olduğu gibi. Ya da temas yüzeyi üzerinde, hareket bir kez başladıktan sonra hareketin devamını kolaylaştıran yağ veya benzeri yabancı unsurların bulunması ve yüzeydeki girintileri doldurmasıdır. Tıpkı birbirine sürtülen iki sünger taşı arasındaki sürtünme kuvvetinin, gözenekler tozla doldukça azalmasında olduğu gibi. Bu durumda, temas yüzeylerinde safsızlık veya kirliliklerin bulunmaması ve geometrik girinti çıkıntıların olmaması halinde, statik ve kinetik sürtünme katsayılarının farklı olması için ortada neden kalmaz. Nitekim, arayüzeyleri iyice temizlenip parlatılmış metal çiftleri için μ_k ve μ_s değerleri arasında bir fark gözlenemiyor. Sürtünme kuvveti aslında, hakkındaki genellemelerin herbirine karşı istisnalar bulunabilen karmaşık bir kuvvet. Örneğin, temas yüzeylerinin daha pürüzsüz ve temiz hale getirilmesi, her zaman için sürtünme kuvvetinin azalacağı anlamına gelmiyor. Çünkü aynı metalden iki parça alınıp da arayüzeyleri yeterince temizlenip, dümdüz hale getirildiğinde; aralarındaki sürtünme kuvveti azalmak bir yana, iki parçayı tek bir parça haline getirecek kadar artabiliyor ve buna 'soğuk kaynak' deniyor.

Konuyu toparlamak üzere, alttaki şeklin üst kısmında, ağırlığı örneğin F_N=mg=100 newton olan bir cisim ve üzerindeki kuvvetler gösteriliyor. Şeklin alt kısmında, cisimle zemin arasında oluşan sürtünme direncinin, uygulanan yatay kuvvete göre grafiği var.

Statik sürtünme direncinin büyüklüğü değişken ve normal kuvvetlerden bağımsız olup, her aşamada, cisme o an uygulanmakta olan yatay kuvvete eşit. Bu durum, şeklin alt tarafındaki grafikte 45° eğimli doğrusal kesim olarak görülüyor. Cismin harekete geçmesinden hemen önceki 'eşik' anında, statik sürtünme direnci maksimum değerine ulaşıyor. Bu değer artık, uygulanan yatay kuvvetten bağımsız ve ara yüzeye dik olan 'normal' kuvvetle doğru orantılı. Orantı katsayısı pı$_s$=0,5. Dolayısıyla, $F_s=\mu_s F_N$=0,5x100=50 newton. Eşik değeri aşılıp da cismin harekete geçmesinden sonra, kinetik sürtünme dev-



reye giriyor. F_k'nin büyüklüğü de F_s gibi; uygulanan yatay kuvvetten bağımsız olup, ara yüzeye dik olan 'normal' kuvvetle doğru orantılı. Orantı katsayısı μ_k=0,4. Bu durum, aynı grafiğin devamındaki yatay doğru olarak görülüyor. İki doğrusal kesim arasında, sürtünme kuvvetinde bir azalma gerçekleşmiş ve $F_k=\mu_k F_N=0{,}4x100=40$ newton. Statik sürtünmeyle ilgili olarak dikkat edilmesi gereken husus, $F_s=\mu_s F_N$ ilişkisinin yalnızca, hareketin başlamasından hemen önceki statik sürtünme direncinin büyüklüğünü veriyor olmasıdır, daha öncekileri değil. Bu eşik değerinden öncesi için; statik sürtünme direnci F_{sd}'nin büyüklüğü, tekrar pahasına; F_N'den bağımsız olup, cisme uyguladığımız yatay kuvvete eşittir.

Statik ve kinetik sürtünmeden başka, bir de 'yuvarlanma sürtünmesi'nden söz edilir. Örneğin bir araba tekerleğinin 'kaymadan yuvarlanma'sı sırasında, lastiğin en alt noktası her an için yerdeki bir noktayla temas halindedir. O kısa süreli temas sırasında, iki nokta öpüşmüş olup; tekerin merkezinden bakıldığında aynı hızla geriye doğru kaçıyor olmakla beraber, yerden bakıldığında hareketsizdirler. Tekerle yer arasındaki sürtünme kuvvetinin tamamı, öpüşen bu iki nokta üzerinde toplanmıştır. Noktalar birbirine karşı hareket halinde olmadığından, bu bir statik sürtünme kuvvetidir ve kuvvet eşik değerine ulaşmamışsa eğer, büyüklüğü normal kuvvetlerden hareketle hesaplanamaz. Sistemin dinamik denklemlerinin yazılıp çözülmesi gerekir.

Önemli olan şu ki; noktalar birbirine karşı hareket etmediğinden, bu sürtünme kuvvetine karşı iş yapılmamaktadır. Dolayısıyla kuramsal olarak, 'kaymadan yuvarlanma' sırasında, lastiklerde enerji kaybının olmaması gerekir. Fakat lastik yol buyunca ezişip büzüşerek, şekil değiştirip durmaktadır ve ideal esnek bir malzeme olmadığından, kısmen de plastik şekil değiştirmelerine uğramaktadır. Şekil değiştirmelerin bu plastik bileşeninin emdiği enerji, geriye alınamazdır ve ısıya dönüşür. Öte yandan, tekerleğin aksında, metalin metale sürtünmesinden dolayı sürtünme kayıpları vardır. Sonuç olarak; bu kayıpların hesabına yönelik, üçüncü bir 'kaymadan yuvarlanmanın sürtünme katsayısı' μ_Y tanımlanır. Kaldı ki, lastikler ara sıra patinaj yaparak kayar da...

Sürtünme kuvveti katı cisimlere özgün değil. Sıvılar ve gazlar arasında da var. Bizim için bazen sorun oluşturmakla beraber işimize çok yarıyor. Örneğin, yerle aramızdaki sürtünme kuvveti olmasaydı, Dünya'yı geriye doğru itip, kendimiz ileri doğru hareket edemezdik. Bir otomobil, keza öyle. O zaman, yegâne hareketli canlılar kuşlar olabilirdi. Onlar da, uçuş sonrasında bir dala konup pençeleriyle dalı kavradıklarında, dalın etrafında pervane gibi döner dururdu. Hayat zor olurdu.

Sürtünme kuvvetinin sağladığı hareket imkânından yararlanıyor, yol açtığı enerji kayıplarını azaltmak için de yöntemler arıyoruz. Sürtünen yüzeyler arasına kaygan maddeler koyarak, bu kayıpları azaltmaya çalışıyoruz. Cisimlerin ve çeşitli yağlama malzemelerinin sürtünme özelliklerini inceleyen bilim dalına 'triboloji' deniyor. Ancak, iki cisim arasındaki sürtünmeyi azaltmanın tek yolu, arayüzeyi yağlamak değil. Bu amaçla, hızlı tren raylarında olduğu gibi, manyetik kaldırma kuvvetlerinden de yararlanılıyor. Keza, yüzeylerin sürtünme sırasında çıkardıkları ses dalgaları, iki yüzey arasında bir 'enerji yastığı' oluşturarak bu kayıpları azaltıyor; buna 'akustik yağlama' deniyor. II. Dünya Savaşı'nda kullanılan Panzer tanklarının paletlerinde olduğu gibi...

Malzeme çiftleri arasındaki sürtünme katsayıları, genelde 0 ila 1 arasında değişmekle birlikte, 1'den büyük de olabiliyor. Örneğin, ara yüzey temiz ve kuru olmak kaydıyla; gümüşün gümüş üzerindeki statik sürtünme katsayısı 1,4. Katıların kauçuk üzerindeki μ_k değeri, 1 ila 4 arasında değişiyor. 'Soğuk kaynak' durumunda ise sürtünme katsayısı daha da büyük değerler alabiliyor. Sürtünme katsayılarının en küçük değerlerine gelince, teflon üzerinde teflon için; $\mu_s=\mu_k=0{,}04$. Eklemlerimiz için, bu iki değer, keza birbirine eşit ve daha bile küçük: 0,01. Harika bir yağlayıcısı var. Fakat uzun süredir sanılanın aksine, sürtünme katsayısı 0 da olabiliyor. Yakınlarda, karbon yapıların incelenmesi sırasında keşfedilen ve 'süperyağlama' denilen etkide, birbirinin üzerinden kayan iki karbon yapı arasındaki sürtünme kuvvetinin 0 olduğu gözlemlendi.

DURGUN SULAR NEDEN SOĞUK KANIN RENGİ NİYE BÖYLE?

Nerede kalmıştık? Enerji: Genelde ‘iş yapma yeteneği’ olarak tanımlanır. İş nedir: ‘Kuvvet çarpı yol’. Yani iş yapılabilmesi için hem kuvvet olacak hem de yol. Biri veya diğeri, tek başına yetersiz. Geçen sefer yatay bir zeminde duran, $F_N=m.g$ ağırlığındaki bir cismi, yatay bir kuvvet uygulayarak harekete geçirmiştik. Cisim harekete geçene kadar, uyguladığımız kuvvete eşit, fakat ona ters yönde bir ‘statik sürtünme direnci’yle karşılaşmıştık. Bu sırada cisim hareket etmediğinden uyguladığımız kuvvet yol kat etmiyordu. Sadece kas liflerimizde iş yapılıyordu. Bu da bizi terletmiş ve uyguladığımız kuvvet sonunda, statik sürtünme kuvveti dediğimiz $F_S=\mu_S.F_N$ eşik değerini aşınca, cisim harekete geçmişti. Geçer geçmez, sürtünme direnci, ‘kinetik sürtünme kuvveti’ denilen $F_k=\mu_k.F_N$ değerine azalmıştı. Bu durumda, uyguladığımız kuvvet F, kinetik sürtünme kuvvetinden, diyelim $F-F_k=\Delta F$ kadar büyük kaldığından; cisim, $\Delta F=m.a$ gereği ivmelenerek hız kazanmaya başlar. Cisim artık hareket ediyor olduğuna göre, üzerinde iş yapılmaktadır. F kuvvetini biz uyguladığımıza göre, işi yapan bizizdir. Cismin üzerinde yaptığımız iş pozitif, cismin bizim üzerimizde yaptığı iş negatif olur. Tıpkı bütçe hesaplarında gelirlerin artı, harcamaların eksi sayılmasında olduğu gibi. F’nin F_k kadarının yaptığı iş, kinetik sürtünmeyi yenmek için harcanmakta ve cisimle zeminin temas yüzeylerinde ısı olarak açığa çıkmaktadır. F’nin, ΔF kadarki kalan kısmı ise cismi ivmelendirir. Uyguladığımız kuvveti F_k’ya indirirsek, ivmelenme durur. Cismin hızı, diyelim bir v değerinde sabitleşmiştir. Uyguladığımız $F=F_{k'}$ artık sadece kinetik sürtünme kuvvetini yenebilmekte ve yaptığı iş arayüzeyde ısıya dönüşmektedir. Peki, daha önce ΔF kuvvetiyle yaptığımız iş nereye gitmiştir? $KE=mv^2/2$: Hareket enerjisi bu, kinetik enerji, cismin belli bir hızla hareketinde bağıl olan enerji... İlginç, demek ki ben parmağımla masanın üzerindeki kibrit kutusunu iterken, ona enerji aktarıyorum, vücudumdan. Parmağım enerji aktarım aracı oluyor...

Bir de cismin sürtünmesiz bir yüzeyin üzerinde olduğunu, hatta daha iyisi boşlukta durduğunu varsayalım. “Boşlukta nasıl durur?” derseniz; etrafta kuvvet uygulayan bir gezegen ya da başka cisim yok.

Öte yandan, boşlukta kimin durup kimin hareket ettiğini, arada ivmelenme yoksa belirlemek imkânsız. Diyelim cisimle aynı başvuru sistemindeyiz ve onu x ekseni doğrultusunda hareket ettireceğiz. Eksenin başlangıcı cismin kütle merkezinde, yönü sağa doğru olsun. Cisme F kuvveti uyguladığımızda, ivmesi F=m.a'dan, a=F/m kadar olacaktır. Saatimizi sıfıra ayarlayıp çalıştırdığımız anda kuvveti uygulamaya başlayalım. Cismin sıfırla başlayan hızı, saat t'yi gösterdiğinde, sabit F/m ivmesiyle, v=Ft/m'ye ulaşır. Bu süredeki ortalama hızı (0+Ft/m)/2 olduğundan, kat ettiği yol Δx= (Ft/2m).t olur. O halde üzerindeki sabit F kuvvetinin yaptığı iş, $W=F.\Delta x=F^2t^2/2m$ kadardır. Ya da t anındaki hızı v=Ft/m cinsinden, $W=mv^2/2$ kadar. Kuvveti uygulamaya son verdiğimiz t_0 anından itibaren, cisim $v_0=Ft_0/m$ sabit hızıyla yoluna devam eder. Hareketinde bağıl olan enerji tarafımızdan sağlanmıştır, kuvveti biz uygulamış olduğumuza göre... Kendiliğinden ivmelenemiyor. İvmelense eğer, hızıyla birlikte kinetik enerjisi artacak. Ama bu enerjinin bir yerden gelmesi lazım, örneğin birilerinin onun üzerinde kuvvet uygulayarak iş yapması... Öte yandan kuvvet yoksa eğer, hızını koruyor. Yavaşlayacak olsa, hızıyla birlikte kinetik enerjisi azalacak. Bu enerjinin bir yere gitmesi lazım, nereye?... Etrafta bir başkası olacak ki; o başkasının üzerinde kuvvet uygulayıp iş yaparak kendi enerjisini azaltsın. O zaman da, o başkasının enerjisi artıyor... Demek ki bu durumda, kinetik enerji korunuyor. Korunan unsurlarsa önemli. Değişen koşullar içeren problemleri çözerken, sendelenildiğinde omuz dayanacak duvarlar veya yola devam edebilmek için kullanılacak koltuk değnekleri gibiler.

Kinetik enerjinin korunumunu ilk öneren Alman bilimci Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) oldu. Çok parçacıklı sistemlerde mv^2'lerin toplamının korunduğu nu fark etmişti. Buna sistemin 'canlı kuvveti' *(vis viva)* dedi. 1676-89 yılları arasında, bir korunum ilkesi formüllendirmeye çalıştı. Fakat çağdaşı olan Isaac Newton (1642-1727), *Doğa Felsefesinin Matematik İlkeleri (Philosophiae Naturalis Mathematica Principia)* adlı kitabını 1687 yılında yayınlamış ve çağının devi haline gelmişti. İngiltere'de Newton, Fransa'da Rene Descartes (1596-1650), asıl 'yönlendirici ilke'nin, korunan *vis viva*'nın momentum olduğunda ısrarlıydılar. Daha sonra Newton, bağımsız olarak geliştirdikleri integral hesabı konusunda Leibniz'le, onu 'intihal'le suçlamaya varan sert bir tartışmaya girdi. İtibarı Leibniz'i gölgede bıraktı. Hem de "mv^2'lerin toplamı"nın bazı durumlarda korunmadığı zaten gösterilmişti. Bu gelişmeden en fazla, mühendisler rahatsız oldu. Çünkü 'topçu okulları'nda, örneğin eğik atış problemini, yalnızca momentumun korunumu denklemiyle çözemiyorlardı. Bir denkleme daha ihtiyaçları olduğunu söylüyor, "bırakın da kullanalım" diyorlardı. Kullanmaya devam ettiler ve Avusturya topçusu Osmanlıları ardı ardına yenilgilere uğrattı. Buna ve aradan 319 yıl geçmiş olmasına karşın, Newton'un *Mathematica Principia*'sının orijinali hâlâ Türkçeye çevrilmedi. Leibniz'in korunumunu önerdiği *vis viva*'nın aslında, mv^2'lerin değil, $mv^2/2$'1erin toplamı olması gerektiği, büyük oranda, Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843) ve Jean-Victor Poncelet'in (1788-1867) 1819-39 yılları arasında yaptıkları çalışmaların sonucuydu. Birincisi bu niceliğe 'iş miktarı' derken, ikincisi 'mekanik iş' demişti. Şimdiki adıyla 'kinetik enerji'... İfadedeki mv^2'nin önüne 1/2 çarpanının konması, Leibniz'den o yana geçen 150 yıla ek olarak, 20 yıl daha almıştı. Kinetik enerji böyle. Aslında: $E=\int v.dp=\int v.(dp/dt)dt$. Kuvvet $F=dp/dt=d(mv)/dt$ olduğuna göre, $E=\int v.Fdt$. Bu ifade, relativistik olmayan hızlarda kütle pek değişmediğinden, yani $F=dmv/dt=m.dv/dt$ olduğundan, $E=m\int v.dv/dt=mv^2/2$ oluyor. Newton'un klasik limiti... Potansiyel enerji nedir?

Parmaklarımızın arasında, kütlesi m olan bir taş tuttuğumuzu düşünelim. Taşı bıraktığımız takdirde, z ekseni boyunca düşmeye başlayacak. Eksenin başlangıcı taşın kütle merkezinde, yönü aşağıya doğru olsun. Taş üzerindeki yerçekimi kuvveti $F_g=m.g$ kadardır. Bıraktığımızda ivmesi, havanın sürtünmesini gözardı edecek olursak, $F=m.a=m.g$'den, g kadar olacaktır. Saatimizi sıfıra ayarlayıp çalıştırdığımız anda taşı bırakalım. Taşın sıfırla başlayan hızı, saat t'yi gösterdiğinde, sabit g ivmesiyle, gt'ye ulaşmıştır. Bu süredeki ortalama hızı, $(0+gt)/2$ olduğundan, kat ettiği yol, $\Delta z=(gt/2).t$ olur. O halde, üzerindeki sabit mg kuvvetinin yaptığı iş, 'kuvvet çarpı yol'; $W=F.\Delta z=mg^2t^2/2$ kadardır. Bu da; t anındaki hız, $v=gt$ cinsinden, $W=mv^2/2$, kat edilen yol veya kaybedilen yüksekliği veren $\Delta z=gt^2/2$ cinsinden ise, $W=mg\Delta z$ olur. Taşın başlangıçtaki 'potansiyel enerji'si, $mg\Delta z$ kadar azalarak kinetik enerjiye dönüşmüştür. Hatta, sarkaç bunun zirve örneği: Kütle en alttayken kinetik enerjisi maksimum, potansiyel enerjisi minimum; en üstteyken tersi. Hepimizin bildiği gibi...

Ancak, potansiyel enerjinin kinetik enerjiden bir farkı var. Tek bir parçacık kinetik enerjiye sahip olabilirken, potansiyel enerji, birden fazla parçacığın varlığını gerektiriyor. Daha teknik bir deyişle; 'potansiyel enerji, aralarında kuvvet etkileşimleri bulunan çok sayıda parçacıktan oluşan bir sistemin, parçacıklarının birbirlerine göre konumu nedeniyle sahip olduğu iş yapma yeteneği'dir. Düşen taş örneğinde, ikinci cisim Dünya'dır. Aslında taş düşerken, Dünya da taşa doğru hareketlenir. Fakat kütlesi görece çok büyük olduğundan, kazandığı hız ve kinetik enerji, taşınkine oranla gözardı edilebilecek kadar küçüktür. Sonuçta taşın ve Dünya'nın kütle merkezlerinin, aralarındaki kütleçekim kuvveti nedeniyle, birbirlerine göre konumu değişmiş ve bu ikili sistemin 'kütleçekimsel potansiyel enerji'si azalarak, hemen tümüyle taşın kinetik enerjisine dönüşmüştür. Parçacıkların arasındaki kuvvetin türüne bağlı olarak, değişik potansiyel enerji türlerinden söz edilir. Örneğin artı yüklü iki parçacığı birbirine yaklaştırmak için, üzerlerine, hareket yönünde kuvvet uygulamamız gerekir. Bu iki parçacıklı sistemi, bir yay gibi sıkıştırmakta ve sistemde, yaptığımız iş kadar 'elektrostatik potansiyel enerji' depolamaktayızdır. Bir yay da zaten, sıkıştırılırken atomları arasındaki elektrostatik itme kuvvetlerine karşı iş yapılarak potansiyel enerjinin depolandığı, serbest bırakıldığında da bu enerjinin, ısıya dönüşen kısmı hariç hemen tümünün kinetik enerji olarak geri alındığı, çok parçacıklı bir sistemdir. Öte yandan, potansiyel enerji açısından önemli olan, sistemin herhangi bir halindeki 'mutlak değer'i değil, bir halden diğerine geçerkenki değişimidir. Buna, sistemin iki hali arasındaki 'potansiyel farkı' da denir. Haller böyle olunca, "sistemin hangi durumundaki potansiyel enerjiye 0 değeri vereceğiz" sorusunun yanıtı basitleşir: Hangisini istersek ona... Örneğin, iki protonun oluşturduğu ikili sistemin, aralarındaki uzaklık sonsuz ikenki halini, potansiyel enerjinin 0 olduğu hal olarak alabiliriz. Genelde böyle yapılır zaten.

Zıt yüklü parçacıklar için iki protonunkine ters bir durum söz konusudur ve parçacıklar, birbirlerinden örneğin sonsuz uzaklığa konulup serbest bırakıldıklarında, kendiliklerinden hızlanır. Başlangıçta durağan olduklarından, hızlar ve kinetik enerjiler sıfırdır. Sistemin kütle merkezininki de öyle. Hatta momentumun korunumu gereği, parçacıklar birbirlerine karşı, kütleleriyle ters orantılı hız kazandıklarından, kütle merkezi hep sabit kalır. Zaten sisteme dışardan etkiyen bir kuvvet bulunmadığına göre, kütle merkezinin hızının değişmemesi gerekir. Dolayısıyla, sistemin kinetik enerjisi tümüyle parçacıkların birbirlerine göre hareketinden kaynaklanmaktadır. Buna, 'sistemin iç kinetik enerjisi' de denilebilir. Öte yandan, sistemin potansiyel enerjisi, içerdiği parçacıkların birbirlerine göre konumlarından kaynaklanmakta olup, bir 'iç potansiyel enerji'dir. Zaten ortada sistemin bir kuvvet aracılığıyla etkileşeceği başka sistemler bulunmadığına göre, sistem için bir 'dış potansiyel enerji' söz konusu değildir. Parçacıklar birbirlerine doğru hız kazandıkça; ikili sistem, elektrostatik iç potansiyel enerjisini iç kinetik enerjiye dönüştürmektedir. İç potansiyel enerji giderek azaldığına ve başlangıç değeri de 0 olduğuna göre, giderek negatifleşir. Parçacıkların kinetik enerjilerinin toplamı ise sistemin iç kinetik enerjisini vermekte olup, daima pozitiftir. Değeri her an için iç potansiyel enerjinin mutlak değerine eşittir. Dolayısıyla bu durumda, ikisinin toplamı hep sıfır olur. Benzeri durumlarda da sıklıkla korunduğundan, bir sistemin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına özel bir ad verilip 'mekanik enerji' denir. Aslında, kütleçekimi ve elektromanyetik kuvvetlerin yanında, güçlü ve zayıf kuvvetlerle taşıyıcıları da göz önünde bulundurulduğunda, bilinen tüm enerji türleri, mikro ölçekte bu ikisine indirgenebilir. Dolayısıyla, mekanik enerji mikro ölçekte, klasik olarak hep korunur. Ancak makro ölçekte, korunmaz göründüğü durumlar vardır. Isıya dönüşerek gözden kaçtığı. Nedir ısı?...

Isı, mikro ölçekteki kinetik enerjinin makro ölçekteki belirtisidir. Örneğin tek atomlu ideal gazlar için, atom başına ortalama kinetik enerji $mv^2/2=3k_BT/2$. Burada T, Kelvin cinsinden sıcaklık, k_B ise Boltzman sabiti. Niye böyle? Önce, niye "tek atomlu" gaz? En basit halini ele alalım diye. "İdeal gaz" ne demek? Yeterince seyreltik olan ve atomları, sert toplar gibi, tümüyle elastik şekilde çarpışan bir gaz. Niye seyreltik? Atomları arasındaki uzaklıklar, atom boyutlarına göre çok büyük olsun da; atomlar çarpışma anı dışında, aralarındaki kuvvetler aracılığıyla potansiyel enerji depolayabiliyor olmasınlar diye. Böyle bir gazın herhangi bir atomu, kısa süren çarpışma anları dışında, sadece kinetik enerjiye sahip olabilir ve birbirine dik üç doğrultuda (x,y,z) hareket özgürlüğüne sahiptir. Bu sayıya atomun, 'hareket özgürlüğünün derecesi' denir ve atom, 'eş paylaşım' (*equipartition*) teoremine göre, her derece başına $k_BT/2$ enerjiye sahip olabilir. Bu yüzden, bu durumda toplam kinetik enerji: $mv^2/2=3k_BT/2$. Bir mol gaz için bu miktar $3N_{Av}k_BT/2$ olur. $R=N_{Av}k_B$'ye, 'ideal gaz sabiti' denir. Dolayısıyla, tek atomlu bir mol ideal gazın sıcaklığını, hacmi sabit kalmak kaydıyla 1 K artırmak için gereken enerji miktarı, $C_v=3R/2$ olur. Buna 'sabit hacimdeki mol ısı kapasitesi' denir. 'Sabit basınçtaki mol ısı kapasitesi' ise, $C_P=5R/2$ olup, C_v'den; gaz, hacmi değişirken çevreye karşı iş yapmak zorunda kaldığından dolayı, R kadar daha büyüktür. $C_P=C_V+R$ ilişkisine, ilk türeticisi Julius Robert von Mayer'in anısına 'Mayer ilişkisi' deniyor. Kullandığımız gaz tanımına en yakın tek atomlu asal gazlar için 1 atmosfer basınç ve 25°C'de ölçülmüş olan C_v değerleri yandaki tabloda veriliyor. Uyum olağanüstü. İki atomlu gazlar için de oldukça iyi. Daha karmaşık gazlar, sıvılar ve katılar için durum daha karışık.

17. yüzyılda ısı ve yanma olayları birbirine karıştırılıp, birlikte ele alınıyor ve bazı malzemelerin 'filojiston' denilen bir madde içerdiği düşünülüyordu. Kurama göre, böyle bir malzeme filojistonsuz hava ile karşılaştığında yanıyor ve filojistonunu havaya verip onu ısıtırken, kendisi kül (*calx*) olup 'gerçek formu'na dönüşüyordu. Bu durumda, yanan her cismin kütlesinin azalması lazımdı. Halbuki, örneğin magnezyum yandığında kütlesi artıyordu. Savunucularından bazıları, filojistonun negatif kütleli, bazıları da havadan hafif olduğunu ileri sürerken, Antoine-Laurent Lavoisier (1743-94) 1778 yılında oksijeni ayrıştırarak bu kuramı öldürdü. Yerine, yanmanın 'kalorik kuram'ını önerdi. Buna göre 'kalorik', maddeye bağlanma eğilimi olan, fakat kendi kendisini de iten, elastik ve kütlesiz bir akışkandı. İçine aktığı cismi ısıtıyordu. Bir cismin içeriğindeki kalorik yoğunluğu ne kadar fazla ise, sıcaklığı o kadar yüksekti. Bu durumda, belli bir maddenin miktarı arttıkça, içerdiği 'kalorik'in de artması gerekiyordu. Halbuki Kont Rumford (1753-1814) top namlularını oyarken, oyuğun çapı büyüyüp de malzeme miktarı azaldıkça, çıkan ısının azalmak bir yana arttığını gözlemlemişti. 1789'da yayınladığı kitabıyla 'kalorik kuramı'na karşı çıktı. Öte yandan, Alman tıpçı Julius Robert von Mayer (1814-78) 1840 yılında gemi doktoru olarak Doğu Hint adalarına seyahati sırasında, fırtınanın kamçıladığı dalgaların sularının, dingin deniz suyundan daha sıcak olduğunu fark etmişti. Tedavi ettiği bir yerlinin kanının, kendisininkinden çok daha koyu renkte olduğunu görünce, bunun da nedenini düşündü. Bu insanlar daha sıcak bir iklimde yaşadıklarından, vücut ısılarını korumak için daha az enerjiye gereksinim duyuyor, dolayısıyla da daha az oksijen soluyor olsalar gerekti. Kandaki oksijen miktarı azaldığında rengi koyulaşıyor, aksi halde kıpkırmızılaşıyordu. Oksijenin yanmanın aracı olduğu artık bilindiğine göre, vücut kimyasal enerjiyi ısıya dönüştürüyor olmalıydı. Kamçılanan dalgalar da, mekanik enerjiyi... Döndüğünde fizik çalıştı ve adıyla anılan ilişkiyi türetti. 1843 yılında James Prescott Joule (1818-89) ünlü kalorimetre deneyiyle, mekanik enerjinin ısıya dönüştüğünü gösterdi. Rudolph Clausius (1822-88) 1850'de termodinamiğin birinci yasasını oluşturan enerjinin korunumu ilkesini geliştirdi. Kalorik kuram yıkılmıştı. Yerini 'kinetik kuram'a bıraktı. Fakat Sadi Carnot'un (1796-1832) kinetik kuramdan haberi yoktu. 1824 yılında 28 yaşındayken, kalorik kuramdan hareketle 'Carnot döngüsü'nü geliştirip, termodinamiğin ikinci yasasının temelini attı.

Halbuki, birinci yasanın keşfine daha on, mekanik enerjinin ısıya eşdeğerliliğine yirmi yıl vardı. Pierre-Simon Laplace (1749-1827) ise, aynı eski kuramı kullanarak, Newton'ın 'puls denklemi'ne bir düzeltme ekledi. 'Carnot döngüsü', 2006 yılında hâlâ kullandığımız ısı makinelerinin davranışını yönetirken, Laplace'ın kuramsal düzeltme faktörü, 'adiyabatik gaz indisi' olarak ses hızı hesaplarında kullanılıyor. Bu olgu bilim felsefesinde, bir kuramın başarısının doğruluğunda yattığını savunan 'bilimsel realizm' taraftarlarına karşı kullanılmakta: Doğru sonuçların yanlış bir kuramdan da türetilebileceğinin nadir bir örneği olarak... Sahi?... Kimyasal enerji neydi?...

NEYİN BABASIYDI HEREDOT?

Kimyasal enerji?... Atom ve moleküllerin elektron yapılarında gizli. En basit atomu alalım, hidrojen atomu: Nasıl bir şey bu? Bir protonla bir elektron, elektron protonun etrafında dönüyor, klasik olarak diyelim. Dönmesi de lazım, ki protonun üstüne düşmesin; birbirlerini çekiyorlar çünkü, çekim kuvveti merkezcil ivmeyi denkliyor olsun. Yarıçapı? Yörüngesinin... Elektronun hangi enerji düzeyinde olduğuna bağlı; biz en düşüğünü alalım, hidrojenin 'temel enerji durumu'. Bohr Modeli[1] veriyor bunu, elektronun kinetik enerjisini de, aslına yakın.

---

[1] Atomun varlığı, klasik mekaniğin açıklayamadığı olgulardan biriydi. Çünkü, örneğin hidrojendeki elektronun, protonun çekim kuvveti nedeniyle, çekirdeğe düşüp protonla birleşmesi gerekiyordu. Gerçi, elektron yörüngede belli bir v hızıyla dönüyorsa eğer, Dünya ile uydusu Ay örneğinde olduğu gibi; protonun çekim kuvveti ($e^2/4\pi\varepsilon_0 r^2$), elektronun tabi olduğu merkezî ivmeyi (v^2/r) sağlıyor olabilirdi:

$e^2/4\pi\varepsilon_0 r^2=mv^2/r$ veya $v^2=e^2/4\pi\varepsilon_0 mr$ **(1)**

Ancak bu durumda da, dairesel bir hareket sürdürmekte olan elektronun, sürekli ivmeleniyor olduğundan, ivmelenen her yük gibi, ışıyarak enerji kaybedip, protonun üstüne düşmesi gerekirdi. Bohr, hidrojen atomunu oldukça iyi açıklayan bir kuantum modeli geliştirdi. Buna göre, elektronun yörünge açısal momentumu (mvr) kesikli değerler alarak ħ'ın tamsayı katlarına eşit olmak zorundaydı:

$mv_n r_n=n\hbar$ veya $v_n^2=n^2\hbar^2/m^2 r_n^2$ **(2)**

(1) ile **(2)**'nin eşitlenmesi, elektronun yörünge yarıçapının alabileceği değerleri verir:

$n^2\hbar^2/m^2 r_n^2=e^2/4\pi\varepsilon_0 m r_n$ veya $r_n=4\pi\varepsilon_0 n^2\hbar^2/me^2$ **(3)**

Bu yörüngelere karşılık gelen kinetik enerji değerleri, **(1)**'den bulunabilir:

$KE_n=mv_n^2/2=e^2/(2x4\pi\varepsilon_0 r_n)$ **(4)**

(4)'e **(3)**'ü yerleştirmek sonuç ifadeyi verir:

$KE_n=me^4/2x(4\pi\varepsilon_0 n\hbar)^2$ **(5)**

Yarıçapı en küçük olan yörünge, n=1 yörüngesidir ve hidrojenin temel enerji durumuna karşılık gelir: $r_1=R=4\pi\varepsilon_0\hbar^2/me^2$. İlgili; $m=0{,}911x10^{-30}$ kg, $e=1{,}6x10^{-19}$ Coulomb, $\varepsilon_0=8{,}85x10^{-12}$ $C^2/N.m^2$, $\hbar=1{,}05x10^{-34}$ J.s değerleri yerleştirildiğinde, $R=0{,}525x10^{-10}$ m bulunur.

Yarıçap, $R=0{,}528x10^{-10}m$, kinetik enerji $E_K=e^2/(2x4\pi\varepsilon_0 R)=21{,}9x10^{-19}J$. Joule burada açıkça, fazla büyük bir enerji birimi. Elektronvoltu kullanalım, eV: Nedir o?... Nasıl ki kütlesi m olan bir taş, h yükseklik farkı kadar düştüğünde mgh kadar kinetik enerji kazanıyorsa; q yüklü bir parçacık da V kadarlık bir gerilim farkı üzerinden 'düşürüldüğünde', qV kadar kinetik enerji kazanır. Bir elektronun 1 V'luk gerilim farkı üzerinden düşürülmesi halinde kazandığı kinetik enerji miktarı, elektronvolt. Elektronun yükü $e=1{,}6x10^{-19}C$ olduğuna göre: $1eV=1{,}6x10^{-19}Cx1V =1{,}6x10^{-19}J$. Bu birim cinsinden, hidrojen atomunun temel durumundaki elektronun kinetik enerjisi; $E_K=21{,}9x10^{-19}$ $J=13{,}7eV$ olur. Okuması daha kolay, yazması...

Demek ki yarıçap belli, E_K belli: Ben böyle bir atomu nasıl yaparım? Diyelim elimde serbest bir elektronla proton var... 'Serbest' ne demek: Birbirlerini etkilemiyorlar, sonsuz uzaklıktalar. O halde; protonu koydum ortaya diyelim, 'göz'ümün önüne, elektronu da sonsuza götürüp, öyle başladım. Parçacıklar hareket etmiyor, kinetik enerjiler sıfır. Potansiyel enerji? Başvuru değeri, sonsuz uzaklıktaki değer; sıfır alınırsa, o da öyle. Mekanik enerji; o da, $E_M=E_K+Ep=0$. Sıfıra sıfır elde var sıfır: Kinetik, potansiyel ve mekanik enerjilerin herbiri; iki parçacıktan oluşan bu 'ikili sistem' için sıfır. Başlangıç durumu böyle, renksiz, sıkıcı.

Ama gerilmiş yay gibiler. Bırakalım parçacıkları. Elektromanyetik çekim kuvveti nedeniyle, birbirlerine doğru harekete geçerler. Elektron üzerindeki kuvvet, hareketi yönünde. Protonunki de keza, hareketiyle aynı yönde; fakat 'etki eşittir tepki' gereği, elektronunkine ters. Dolayısıyla, parçacıkların her biri, diğerinin üzerinde iş yapmakta ve ikisi de, birbirlerine doğru koşarken kinetik enerji kazanmaktadırlar. İkisi de kazanıyorsa eğer, değirmenin suyu nereden geliyor? Sistemin başlangıçtaki potansiyel enerjisinden: Gerili yay gibiydiler ya, bıraktık koşuyorlar. Potansiyel enerji başlangıçta sıfırdı: Demek ki giderek negatifleşiyor. Başlangıçtaki toplam momentum da sıfırdı; o halde momentumun korunumu gereği, parçacıkların kazandığı momentumların zıt yönlerde ve eşit büyüklükte olması lazım ($m_p v_p=m_e v_e$). Protonun kütlesi elektronunkinin 1833 katı. Dolayısıyla, elektron protona oranla, çok daha hızlı hızlanır. O kadar ki; protonun bu deney sırasında, laboratuvarda hareket etmediğini bile varsayabiliriz. Bu varsayım rahatsız ediyorsa bizi, o zaman kütle merkezi sistemini kullanırız. Parçacıklar başlangıçta durağandı, kütle merkezi de öyle; hem de bu ikincisi, toplam momentum korunduğundan, parçacıklardan farklı olarak, hep durağan kalmak zorunda. O halde, kütle merkezi sistemi laboratuvar sistemiyle çakışıyor. Ne fark var aralarında? Kütle merkezi sisteminde, karşımıza tek bir vektör değişken çıkar; parçacıkların birbirine göre, 'göreli konum'u. Halbuki laboratuvar sisteminde birerden iki vektör konumu vardı parçacıkların, üçerden altı skaler değişken: Üçü nereye gitti? Onlar da kütle merkezinin vektör konumu: Ama o hep sıfır, merkez durağan olduğundan. Dolayısıyla, kütle merkezi sisteminde problem kolaylaşır: İndirgenmiş kütleye ($m=m_e.mp/(m_e+m_p)$) sahip hayali bir parçacığın, üç bileşenli vektör konumunun hesabına dönüşür. Onu çözer, sonra laboratuvara dönerim, içinde bulunduğum sisteme. Ama bu resim biraz karmaşık, onu boşverelim. Biz en iyisi laboratuvar sisteminden bakalım olaya ve protonun hep durduğunu varsayalım. Kütle merkezi sisteminin orijini, protonla neredeyse hep çakışıyor zaten; kütlenin çoğu onda çünkü. Elektronun orijine göre konumu o zaman, protona göre 'göreli konum' oluyor. Biz ona bakalım: Elektrondan çok daha ağır olan proton olduğu yerde dururken, elektronun ona doğru hızlandığını varsayalım. Kinetik enerjinin tümünü elektron kazanıyor olur: Ne kadar?... Protondan r uzaklıkta iken elektrona etkiyen kuvvet: $F(r)= e^2/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$. Elektron dr kadar yol kat ettiğinde, bu kuvvet, F.dr kadar iş yapar: F ile dr aynı yönde olduğundan, çarpım pozitif. Peki; elektronun sonsuzdan kalkıp protonun, hidrojenin yarıçapı olan R kadar yakınına gelinceye kadarki toplam iş ne kadardır? Tüm F.dr'lerin toplamı, yani integral: $W=\int_R^{\infty}(e^2/4\pi\varepsilon_0{}^2)dr=e^2/(4\pi\varepsilon_0 R)=43,8x10^{-19}J=27,4eV$. İşte bu kadar...

Ama bu miktar, hidrojenin temel durumundaki elektronun sahip olması gereken 13,7eV'luk kinetik enerjinin iki katı. Fazla enerjik bu elektron: Protonun R yakınına geldiğinde, yanından 'vıjjjt' diye geçer ve kafa kafaya çarpışsalar dahi, 'kucaklaşıp' hidrojen atomu oluşturmakta güçlük çekerler. Onların bunu başarabilmeleri için elektronun yavaşlatılması, protonun civarında yeterince zaman harcamasının sağlanması lazım. Diyelim 'elimizi' elektronun önünde tuta tuta, onu yol boyunca frenledik ve kazandığı kinetik enerjinin yarısını, peyderpey sızdırıp avucumuzda topladık. Elektron-proton ikilisinden oluşan sistemin, başlangıçta 0 olan potansiyel enerjisi, sonuçta W kadar azalmış, bunun yarısı elektronun kinetik enerjisi olarak kalırken, diğer yarısı avucumuzda toplanmıştır. Sonuçtaki hidrojen atomunu oluşturan ikili sistemin potansiyel enerjisi PE=-W, kinetik enerjisi KE=W/2'dir. Bu ikisinin toplamından oluşan mekanik enerji E=-W/2 olur. Bu yüzden -W/2'ye, hidrojendeki elektronun protona bağlanma enerjisi de denir. Avucumuzdaki W/2 kadarlık enerjiyi sisteme geri verecek olursak, elektron protona bağlanmaktan kurtulacak ve kendi W/2 kadarlık kinetik enerjisinin de katkısıyla uzaklaşıp, ancak, protondan yine sonsuz uzaklığa ulaştıktan sonra duracaktır. Yani iyonlaşır... Bu yüzden, -E'ye, hidrojendeki elektronun veya hidrojenin 'iyonlaşma enerjisi' de denir: 13,7 eV. İlginç bir durum daha var...

Başlangıçtaki ikili sisteme dışarıdan, bir kara kutuymuş gibi bakacak olursak; kütle merkezinin kinetik enerjisi ve sistem olarak dış potansiyel enerjisi sıfırdır. Etkileştiği başka sistem yok çünkü. Dolayısıyla, sistemin toplam enerjisi, içerdiği parçacıkların durağan kütlelerine eşdeğer enerjilerin toplamından ibarettir: $(m_p+m_e)c^2$. Sonuçtaki durağan hidrojen atomuna da keza dışarıdan, bir kara kutuymuş gibi bakacak olursak; kütle merkezinin kinetik enerjisi ve sistem olarak dış potansiyel enerjisi, keza sıfırdır. Dolayısıyla, içerdiği toplam enerji, hidrojen atomunun kütlesinin enerji eşdeğeri olur: m_Hc^2. Öte yandan, avucumuzda W/2 kadar enerji biriktirmiş olduğumuza göre, enerjinin korunumu gereği, başlangıçtaki ve sondaki enerji toplamlarının eşit olması lazımdır: $m_Hc^2+W/2=(m_p+m_e)c^2$. Yani, $m_H=(m_p+m_e)-(W/2c^2)$ olmak zorundadır. Bir başka deyişle, bir elektronla protonu bir araya getirip bir hidrojen atomu oluşturduğumuzda, toplam kütle; elektronun protona bağlanma enerjisinin kütle eşdeğeri $(W/2c^2)$ kadar azalır. Benzer bir durum, tüm diğer atomlar için de geçerlidir.

Dolayısıyla kimyasal enerji; atomlardaki elektronların bağlanma enerjisiyle, bu da elektrostatik potansiyel enerjiyle ilgilidir. Bazı durumlarda, açığa çıkartılabilir. Örneğin, atom numarası 8 olan oksijen, elementler tablosunda, bir asal gaz olan neonun iki sütun ya da 'grup' solundadır. İki elektron daha alsa, 2p yörüngelerindeki 'sekizli'yi (*oktet*) tamamlayıp, asal gaz diziliminin kararlılığına ulaşacaktır. Bu yüzden hep, iki elektron daha almanın peşindedir. Elektron soyguncusudur yani, fıldır fıldır diğer atomları kollayan. Hidrojen atomu ise, tek elektronunu rahatlıkla verebilir. Dolayısıyla, bir oksijen atomu iki hidrojen atomuyla bir araya geldiğinde, hidrojenlerden birer elektron alıp, -2 yüklü hale geçer ve geride kalan +l'er yüklü hidrojenleri kendisine çeker. Sonuçta bir su molekülü oluşmuştur. Bu moleküldeki toplam bağ enerjisi, serbest haldeki iki hidrojenle bir oksijenden oluşan sistemdeki bağ enerjisinden, 2,94 eV daha fazladır. Dolayısıyla, kütle azalmış ve aradaki kütle farkı kadar enerji, 2,94 eV, su molekülünün kinetik enerjisi olarak açığa çıkmıştır. Oluşan su buhar haline geçerse, bu miktar; bir molekül suyun 'buharlaşma ısısı', yani 0,21 eV kadar azalarak, 2,73 eV'a iner. Bu veriler; bir mol eşdeğeri 2 gram hidrojen gazının (H_2), yarım mol eşdeğeri 16 gram oksijen gazıyla (0_2) tepkimeye sokularak, bir mol eşdeğeri 18 gram sıvı su elde edilmesi halinde; N_{av}x2,94eV=286kJ kimyasal enerjinin açığa çıkacağı anlamına gelir. Oluşan su buharsa, bu miktar, suyun buharlaşma ısısı olan N_{av}xO,21eV=41kJ/mol kadar azalarak, 245kJ'e iner. Yani, hidrojenin içerdiği kimyasal enerjinin kütlesel yoğunluğu; sonuç ürünün su olması halinde (286/2) kj/g = 143kJ/g=143MJ/kg, buhar olması halinde de (245/2) kj/g = 122,5kJ/g=122,5MJ/kg düzeyindedir.

Oksijenle tepkimeye girmek açısından, karbon için de benzeri bir durum söz konusudur. Ancak, atom numarası 6 olan karbon, neona 4 elektron uzaklıkta olduğundan, iki oksijen atomuyla birleşerek karbondioksit gazı ($C0_2$) oluşturmayı tercih eder. Karbon atomu başına açığa çıkan enerji 4,08 eV kadardır. Dolayısıyla, bir mol eşdeğeri 12 gram karbon, N_{av}x4,08eV=393 kJ kimyasal enerji içerir. Dolayısıyla saf karbonun, örneğin grafitin, kütlesel enerji yoğunluğu 393kJx(1000/12)=32,77 MJ/kg düzeyindedir. Bu rakam, safsızlıklar içeren kömür için daha az, hidrojen de içeren petrol için daha fazladır. Ona sonra bakarız.

Enerji açığa çıkartan pek çok diğer 'egzotermik' kimyasal tepkime var. Fakat karbon, hidrojen ve oksijen atomlarının konumu çok özel. Dünya ekonomisinin %10 kadarını oluşturan yılda yaklaşık 6 trilyon YTL'lik enerji sektörünün %90'a yakını; bu atomların doğada bulundukları hallerdeki bağlarını kırıp, su ve karbondioksit molekülleri oluşturmanın üzerinde dönüyor. Nedeni şu...

Halikarnaslı Herodot (MÖ 484-y.425) 'Tarihin Babası' olarak bilinir. Yazdıklarında, çoğunun gerçek olduğu sanılmakla birlikte, yapmış olduğu seyahatleri biraz abarttığı ve aktardıklarının arasına, kulaktan dolma bazı bilgiler de kattığı anlaşılıyor. Nitekim, Adıyaman'ın şimdi artık Atatürk Barajı'nın suları altında kalmış olan Samsat ilçesinden 'Samasotah Lucian' (MS 120->160), kendisini yalancılıkla suçlar. Bu kanaat yakın zamanlara kadar yaygındı. Özellikle, Mısır tarihi hakkında anlattıklarının Yeni Krallık döneminden başladığı iddiası kuşkuyla karşılandığından, bazı çağdaş tarihçi ve felsefeciler tarafından 'Yalanların Babası' olarak anıldı. Fakat, 20. yüzyılın ikinci yarısında, Mısır'ın İskenderiye kenti açıklarında keşfedilen batık Heraklion kentiyle kalıntıları, onun bu konudaki anlatımlarını doğrular nitelikte çıkınca, saygınlığı yeniden arttı. Herodot, yazdığı, 9 kitap halinde derlenen 'Tarihler' dizisinin ikincisinde, Mısır piramitlerinden bahseder ve Hufu'nun piramidini gezerken rehberinin kendisine, bu piramidin yapımında 20 yıl süreyle 100.000 işçinin çalıştığını söylediğini söyler. 2 milyon insan-yıl: Doğru mu acaba? Ne derece?...

Diyetine özen gösteren genç bir kadın/erkek, besin kaynaklarından günde 2000/2500 'Kalori' alır. Diyet literatüründe kullanılan 'Kalori' terimi, aslında teknik kalorinin 1000 katı, yani 'kilo kalori' olduğundan, büyük harfle başlatılır. Bir kalori 4,187 Joule olduğuna göre, yetişkin bir erkeğin günlük enerji girdisi $E=2500x1000x4,187=10,47x10^6$ J kadardır. Diyelim 10 milyon joule: 10MJ. Bu enerji günün $\Delta t=86,400$ saniyesinde harcandığına göre, güç; $P=E/\Delta t=120$ J/s, yani insan 120 watt güçle çalışan bir makine gibidir. Bu gücün kabaca; %10'u besinlerin sindirimi (*termogenesis*), %70'i temel metabolizma, %20 kadarı da fiziksel etkinlikler için harcanır. Yani, insan gün boyu 20 W güçle fiziksel iş yapabilir ve bunun dışında, 100 W'lık bir ısıtıcı gibidir. Günde 8 saat, yılda 300 gün çalışan böyle bir insanın yapabileceği toplam fiziksel iş, 8x300x20=48.000 watt-saat, yani 48 kWs veya 172,8 MJ'dür. Gelelim Hufu'nun Büyük Piramit'ine...

Büyük Piramit şimdiki haliyle, kenarı 230,36m olan bir karenin üzerine oturuyor ve yüksekliği 138,75m. Fakat ilk yapıldığında, taban kenarının 231 m, yüksekliğinin de 146,5 m olduğu tahmin ediliyor. Dolayısıyla, başlangıçtaki hacmi; $V=231^2x146,5/3=2,6x10^6m^3$. Yapımında kullanılan taşların yoğunlukları, ton/m^3 cinsinden; kireçtaşı 2,56, granit 2,7-2,8 ve basalt 2,9. İçerdiği boşlukları da hesaba katıp, ortalama yoğunluğu $\rho=2,5$ ton/m^3 olarak alalım. Toplam kütle; $M=\rho V=2,5x2,6x10^6=6,5x10^6$ ton olur. Kütle merkezi piramit tabanından, yüksekliğin üçte biri yukarıda: h=146,5/3=48,8m. O kütle merkezini oraya kaldırmak için yapılması gereken iş: $M.g.h=6,5x10^9x9,8$ $x48,8=3,lx10^{12}J$. Bir insan yılda 172,8 MJ'lük fiziksel iş yapabildiğine göre, yalnızca bu yükseltme işlemi için; $3,lx10^{12}/172,8x10^6=17.940$ insanın bir yıl çalışmış olması gerekir; yaklaşık yirmi bin... Taşların çıkartılıp taşınması, yolda karşılaşılan sürtünme kuvvetlerinin aşılması da var tabii. Sonra işçilik... O kadar düzgün kesilip yontulmuşlar ki, yüzeyleri o kadar düzlemsel ki; halen dahi aralarına bıçak ucu sokulamıyor. Bazılarının kütlesi 15 tonu bulan kireçtaşları Gize'ye 12 km öteden, Nil'in öte yakasındaki Tura'dan, bazıları 60-80 tonu bulan granitler ise, 900 km ötedeki Aswan'dan çıkartılıp getirilmiş. Fakat Herodot'un aktardığı rakamın doğru olması için, yukarıdaki sayının en az yüzle çarpılması lazım. Ne dersiniz? Neyin babasıydı Herodot: 'Tarihin' mi, yoksa?...

Yanıtı sonra. Bir dahaki sayıda. Bir yandan düşünürken, bir de şuna bakalım: Ham petrolün enerji yoğunluğu 45 MJ/kg civarında. Yılda 172,8 MJ fiziksel iş yapabilen 100.000 insan 20 yılda, $345{,}6\text{x}10^6$ MJ iş yapar. Bu kadar enerji $7{,}68\text{x}10^6$ kg petrolde var: 8 bin tondan az. Dünyamız halen yılda 9 milyar ton petrol eşdeğeri enerji tüketiyor: Hufu'nun piramidinden her yıl bir milyondan fazlasını rahatlıkla yapacak kadar...

FOSİL YAKIT ARİTMETİĞİ

Nerede kalmıştık?... Bir karbon atomunun yanmasıyla açığa çıkan enerji 4,08 eV. Elektronvolt; küçük bir enerji birimi, $1{,}6\text{x}10^{-13}$ J. Karbon atomunun kütle numarası 12. Bir kilogramında 1000/12 mol atom var. Mol başına $N_{av}=6{,}025\text{x}10^{23}$ taneden, toplam, $(1000/12)\text{x}N_{av}=502{,}1\text{x}10^{23}$ karbon atomu. Bu kadar karbon atomunda; $4{,}08\text{x}502{,}1\text{x}10^{23}=2{,}04\text{x}10^{26}$ eV kimyasal enerji bulunur. O halde, saf karbonun, örneğin grafitin, kütlesel enerji yoğunluğu, joule cinsinden; $2{,}04\text{x}10^{26}$ $\text{eVx}1{,}6\text{x}10^{-19}$ (J/eV)=$32{,}64\text{x}10^{6}$ J/kg kadar. Diyelim 30 MJ/kg: Bayağı yüksek...

Öte yandan, serbest haldeki iki hidrojenle bir oksijen birleşerek bir su buharı molekülü oluşturduğunda, 2,73 eV enerji açığa çıkar. Yani, hidrojen atomu başına 1,365 eV. 1 kg saf hidrojen, $1000\text{x}N_{av}=6{,}025\text{x}10^{26}$ tane hidrojen atomu içerir. Bu kadar hidrojen atomunda, $1{,}365\text{x}6{,}025\text{x}10^{26}=8{,}22\text{x}10^{26}$ eV kimyasal enerji var. Yani, saf hidrojenin kütlesel enerji yoğunluğu $8{,}22\text{x}10^{26}\text{eVx}1{,}6\text{x}10^{-19}$ (J/eV)=$13{,}15\text{x}10^{7}$ J/kg kadar. Diyelim 130 MJ/kg: Daha da yüksek...

Bu rakamların doğruluk derecesini nasıl sınarım?... Koyarım 'bomba kalorimetresi'nin içine belli bir miktar su, yalıtılmış termos kabı gibi; yakarım içinde 1 gram kömür veya hidrojen. Açığa çıkan ısı dışarıya kaçamaz, hepsi suya geçer. Sıcaklık artışını ölçerim; kütle m ve ısıl kapasite c'yi kullanarak, açığa çıkan enerjiyi hesaplarım ($q=m.c.\Delta T$). Aşağıdaki tabloda, bazı enerji hammaddelerinin, bu şekilde ölçülmüş olan enerji yoğunlukları veriliyor. Örneğin Avusturalya'nın Queensland bölgesinden çıkartılan birinci kalite 'parlak kömür'ün (*antrasit*) kütlesel enerji yoğunluğu 30 MJ/kg. Bu rakamın, yukarıda hesaplanan değere çok yakın olması, kömürün tümüyle saf karbondan oluştuğu anlamına gelmiyor. Aslında, en kaliteli kömürün dahi, kütlesinin %5-10 kadarı, yanıcı olmayan unsurlardan oluşur; diyelim s oranında. Peki, 1 kg'ın, safsızlıklardan geriye kalan (1-s) kadarı nasıl oluyor da 30 MJ içerebiliyor?... Demek ki kömürde, karbonun yanında, hidrojen de var. Diyelim, yakıt kısmındaki karbon oranı x. O halde, 1 kg'ının, safsızlıklardan geriye kalan (1-s) kg'ında, (l-s).x kg karbon, (l-s).(l-x) kadar da hidrojen bulunur. Yani, toplam enerji içeriği, Q=30.(l-s).x+130.(l-s).(l-x) MJ olur.

1 kg'ın yanmasından artakalan safsızlıkların miktarı s tartılıp, açığa çıkan enerji miktarı Q da ölçülmüşse eğer, kömürün içerdiği karbon oranı x, bu eşitlikten hesaplanabilir. Tablonun dördüncü sütununda bu değerler veriliyor: Kaliteli kömür için %67, petrol için %89. Petrol daha fazla hidrojen içerdiğinden, kütlesel enerji yoğunluğu, 45 MJ/kg ile, kömürünkinden ve hatta saf karbondan oluşan ideal grafitinkinden bile daha yüksek. Peki bu enerji yoğunluklarının anlamı?....

	Isıl değer, Q	Birim	% Karbon	CO_2
Hidrojen	121	MJ/kg	0	
Ham petrol	45-46	MJ/kg	89	70-73 g/MJ
LPG	49	MJ/kg	81	59 g/MJ
Doğalgaz	39	MJ/kg	76	51 g/MJ
Kömür, 1. kalite	21,5-30	MJ/kg	67	90 g/MJ
Kömür, 2. kalite	13,5-19,5	MJ/kg		
Kömür, katranlı (bitümlü)	27,0-30,5	MJ/kg		
Kömür, az katranlı	18	MJ/kg		
Linyit, ortalama	9,7	MJ/kg	25	
Linyit, 2. kalite	8,15	MJ/kg		1,25 kg/kWh
Odun (kuru)	16	MJ/kg	42	94 g/MJ

Diyelim kömür A noktasından çıkıyor, halbuki B noktasında tüketilmesi lazım. Q=30 MJ içeren 1 kg'ını karayolu üzerinden taşıyacağım, ittire ittire götürüyorum, kinetik sürtünme katsayısı μ_k=0,3: İçerdiğine eşit miktarda enerji harcayarak, en fazla ne kadar uzağa götürebilirim bu kömür parçasını?... Bu maksimum uzaklık L olsun. Kinetik sürtünme kuvveti $mg\mu_k$= 1x9,8x0,3=2,92 newton olduğuna göre, bu kuvvete karşı, L boyunca yapılan iş W=F.L=Q olmak zorundadır. Yani L=30MJ/(2,92N)=10,3Mm, yani yaklaşık 10.000 km. En kaliteli kömürü dahi, karayolu üzerinden, bu mesafeden öteye taşımaya değmez. Hem zaten, diğer masraf kalemlerinin yanında bir de çıkartılmasının enerji maliyeti var. Petrol için bu mesafe, 45/3=15 misli: 15.000 km. Ancak, deniz ulaşımında sürtünme kayıpları çok daha düşük. Bu sayede, kömür ya da petrolü, Dünya'nın, su ulaşımıyla birbirine bağlı herhangi iki noktası arasında gemilerle taşımak ekonomik hale geliyor. Petrol ve doğalgaz gibi akışkanların kara üzerinden boru hatlarıyla nakli, benzer şekilde; ha katıyı akışkanın üzerinden, ha akışkanı katının içinden, benzer şey; binlerce kilometreye kadar ekonomik olabiliyor. Kömürün de keza, öğütülüp tozlaştırıldıktan ve suyla karıştırılıp akışkanlaştırıldıktan sonra, boru hatları üzerinden pompalanması mümkün. Fakat bu yöntem, görece kısa mesafeler için uygulanmakta. Her durumda, Dünya üzerinde homojen olarak dağılmamış olan fosil yakıtların, üretildikleri yerlerden tüketim merkezlerine nakli, dev uğraşlar gerektirir.

Örneğin bir kömür santralini ele alalım. Kömür santralleri elektrik üretimini genellikle, suyu ısıtarak ürettikleri buharın gücüyle bir türbini döndürerek yaparlar. Türbinin bağlı olduğu jeneratör, örneğin sabit bir manyetik alan içerisindeki bobini döndürüp, Faraday yasasına göre elektrik üretmektedir. Başlangıçtaki kömürün kimyasal enerjisinin, önce mekanik, sonra da elektrik enerjisine dönüştürülmesi sırasındaki 'buhar döngüsü'nün verimi, yaklaşık 1/3 kadardır. Dolayısıyla, örneğin 1000 MW elektrik (e) gücündeki bir santral, aslında 3000 MW ısıl (t) güce sahip olmak ve ürettiği elektrik enerjisinin iki misli kadar ısıyı, başka amaçlarla kullanılamadığı takdirde, çevreye atmak zorundadır. Bu durum, santralin tasarımından bağımsız olup, termodinamik yasalarının kaçınılmaz gereğidir. Böyle bir santral yılın 365x24=8760 saatinin %70'inde tam kapasiteyle çalıştırılırsa eğer; 8760x0,70=6132 milyon kilowattsaat elektrik üretir. Kısaca: 6,13 milyar kWs. Yani, $6{,}13 \times 10^{12}$(J/s)3600s=$22{,}07 \times 10^{15}$ J(e). Bunun üç misli, $66{,}21 \times 10^{15}$ J(t) ısı enerjisi tüketir. Bu kadar ısı, 30MJ/kg'lık kaliteli kömürün, $66{,}21 \times 10^{15}/30 \times 10^{6}=2{,}21 \times 10^{9}$ kg'ında vardır. Yani, 2,21 milyon tonunda. Bu durumda, bu kömürün her kilogramından, 6,13/2,21=2,77 kWh elektrik üretilmektedir. Ya da kWh başına 0,36 kg kömür tüketilmekte...

Kömür madenleri her zaman, elektriğin tüketildiği yerleşim merkezlerine yakın değildir. Dolayısıyla, santrali; ya madenin yanında kurup, üretilen elektriği iletmenin masraf ve kayıplarına katlanmak, ya da yerleşim merkezine yakın konumlandırıp, kömürü santrala kadar taşımak gerekir. Onca kömürün taşınması, zahmetli bir iştir. Bu yüzden, kömüre dayalı elektrik santralleri genellikle madenlerin yanında kurulur. Fakat, en iyi çözüm bazen, çoğu işte olduğu gibi, arada bir yerde olup, kömürün karayolu üzerinden bir miktar taşınmasını gerektirir; diyelim 100 km. Karada kömür taşımanın en ekonomik yöntemi, demiryoluyladır. Yılda 2,21 milyon ton kömür, diyelim her biri 10 ton taşıyabilen yük vagonlarından, 221.000 tanesini gerektirir: Günde 605 vagon. Bu; diyelim 50'şer vagonluk katarlarla, günde 12 sefer demektir. Katarların yüklenip boşaltılması ikişer saat alsa ve yolda ortalama 50 km/saat hız yapılsa, her katarın bir seferi;

'yükle git', 'boşalt dön', ikişerden dörderden, 8 saat alır. Dolayısıyla, tek bir katar günde, 3 sefer yapabilir. Toplam 12 sefer için, 4 katar gerekir. Katarların yolda karşılaşıp kömür veya metal alışverişinde bulunmaması şart olduğuna göre, demiryolunun çift hat olarak döşenmesi lazımdır. Lokomotifin gereken çekme kuvvetini sağlayabilmesi ve özellikle kavisleri dönerken raydan çıkıp devrilmemesi için, tekerlekleriyle raylar arasında, 0,35-0,45 gibi görece yüksek bir dinamik sürtünme katsayısına gereksinim vardır. Halbuki, vagonlar için bu katsayı, daha düşük olabilir. Dolayısıyla, yoldaki sürtünme kayıplarını kısmen de olsa azaltmak amacıyla, vagon tekerlerinin lazer ışınlarıyla işleme tabi tutulup, yüzeylerinde sert ve kaygan bir katmanın oluşması sağlanarak 'sırlanması' yönünde çalışmalar var. Kayıplar ne kadar azalırsa, kâr da o kadar fazlalaşır ne de olsa. Bizim, düğmeye bastığımızda elektriğimizin gelmesi için gün boyu bu işlerle uğraşanlar var. Bazı geceler uyuyamayan. Neyse... Santrale götürüp yaktık bu kömürü diyelim, şöyle ya da böyle: Ne olur? Yılda 2,21 milyon ton kömürün bilançosu...

En kaliteli kömürün %5 ile 10 kadarı, yanıcı olmayan saflızlıklardan oluşur: 110-220 bin ton. Bu 'kül'ün yarısından azı, kum taneleri iriliğinde olup 'dip'te kalırken; büyük bir kısmı, mikro parçacıklar halinde olup, 'uçucu'dur ve baca gazlarıyla birlikte yükselir. Çevreye yayılmaması için, elektrostatik filtreler veya diğer düzeneklerle yakalanması gerekir. Biriktirilen kül, bir setin arkasına yığılıp, üstü kapanır. Dolgu alanının killi zeminli olması tercih edilir ki, külün içeriğindeki; uranyum, toryum ve radyum gibi bazıları radyoaktif olan ağır metaller başta olmak üzere, çevreye zarar potansiyeli taşıyan bileşenler, yağışlarla süzülüp alt katmanlara inerek, yeraltı sularına karışmasınlar.

En kaliteli kömür %1 oranında, sıradan kömürler %2-3 civarında kükürt içerir: En az 22 bin ton. Yanması halinde, kütle numarası 32 olan kükürt, molekül ağırlığı 64 olan kükürt dioksite ($S0_2$) dönüşecektir: 22x64/32=44 bin ton. Bacadan salındığı takdirde, kükürtdioksit, atmosferdeki oksijen ve su buharıyla birleşip, molekül ağırlığı 98 olan sülfürik asit (H_2S0_4) oluşturur: 44x98/64=67 bin ton. Sonuç olarak yağmurlarla birlikte yere inecektir. Buna meydan vermemek için, ya kömür toz haline getirilip hava akımında akışkanlaştırılarak, hem de kömür parçacıklarının oksijenle temas yüzeyi artırılmış olduğundan tam yanmayı kolaylaştıran 'akışkan yatak tekniği'yle yakılır ve bu sırada içine katılan kireç tarafından, kükürtdioksitin açığa çıktıkça, olabildiğince alınması sağlanır. Ya da kükürtidioksitin, normal şekilde yakılan kömürden yükselen baca gazlarının yıkanmasına dayalı ‘ıslak yöntemle yakalanması lazımdır. Bu ikinci yöntem, hem de santralin işleyişini etkilediğinden dolayı daha maliyetlidir. Her iki yöntemde de, daha ziyade yanmış kireç ($Ca\text{-}C0_3$) kullanılır ve kükürtdioksit gazının, katı kalsiyumsülfata ($CaS0_3$) dönüştürülmesine çalışılır. ‘Akışkan yataklı yakma tekniği’ne göre tasarımlanmış ilk santralimiz olan 320 MW’lık Çan termik santralinin faaliyeti, çevre gerekçesiyle geciktirildi. Gerekçe, dolgu alanının killi olan zemininin, ‘yüksek yoğunluklu polietilen’le kaplanmamış olmasıydı. Kaş yaparken göz çıkarmak?...

Kömürdeki hidrojen ise, yandıktan sonra su buharı olup atmosfere karışır. Su buharı etkin bir sera gazı olmakla birlikte, atmosferdeki oranı iklim dinamiklerince denetlenmektedir. Nihayet karbona gelince, kömürdeki oranı, tablodaki gibi ağırlıkça %69 ise, yanan miktarı; 0,69x2,21=1,5 milyon ton kadardır. Kütle numarası 12 olan her karbon atomu ‘tam’ yandığında, molekül ağırlığı 44 olan bir $C0_2$ molekülüne dönüştüğünden; yanan 1,5 milyon ton karbon, 1,5x44/12=5,5 milyon ton karbondioksit oluşturur ve yöntemleri aranıyor olmakla beraber, yakalanması henüz mümkün olmadığından, atmosfere karışır. Sera gazlarından bir diğeridir. 2,21 milyon ton kömürün yanması sonucunda, atmosfere ayrıca 20 bin ton kadar da nitrojen oksit gazları salınır. Bunlardan bazıları ozon tabakasını zayıflatır.

Linyit rezervlerimizin kütlesel enerji yoğunluğu ve rezerv payları

kJ/kg, (kcal/kg)	Pay, %
<6,3 (1500)	57
6,3-10,5 (1500-2500)	23
10,5-14,7 (2500-3500)	18
>14,7 (3500)	2

Ağırlıklı ortalama 7,84 MJ/kg veya 1.872 kcal/kg

Yukarıdaki hesaplar, enerji yoğunluğu yüksek antrasit kömürü için geçerli. Daha düşük kaliteli kömür kullanılması halinde rakamlar kötüleşir. Örneğin yandaki tabloda, yerli linyit rezervlerimizin kütlesel enerji yoğunlukları veriliyor. Toplamı 8,3 milyar tonu bulan bu rezervlerin yarısına yakınını oluşturan Afşin-Elbistan havzasındakiler için enerji yoğunluğu 6,3 MJ/kg’dan az iken; %23’ününki 6,3-10,5 MJ/kg, %18’ininki 10,5-14,7 MJ/kg arasında değişiyor, %2’sinin de 14,7 MJ/kg'dan fazla. Ağırlıklı ortalama 7,84 MJ/kg civarında. Yani, kaliteli antrasit kömürünün 30MJ/kg'lık enerji yoğunluğunun, 7,84/30=0,26'sı kadar. O halde, yukarıdaki; yıl boyunca %75 emreamadelikle çalışıp 6,13 milyar kWh elektrik üreten 1000 MW(e)'lik santral, yılda 2,21 milyon ton yerine, 2,21x3,83=8,46 milyon ton linyit yakmak zorundadır. Yani, kömürün kilogramı başına 0,72 kWh üretmekte, ya da kWh başına 1,38 kg'ını tüketmektedir.

Türkiye, 2006 yılı için 173,1 milyar kWh olarak gerçekleşmesi beklenen elektrik üretiminin 32,6 milyar kWh'ini linyitten sağlamayı planlıyor. Bunu için, 32,6x1,38=45 milyon ton linyit tüketip, önceden de üretmek zorunda. 2020 yılı için öngörülen 450 milyar kWh civarındaki toplam tüketiminin ise, 110 milyar kWh'inin linyite dayandırılması planlanıyor. Bu düzeyde üretim, 150 milyon tona yakın linyit tüketimi gerektirmekte. Hal böyle olursa eğer; bilinen linyit rezervlerimizin, termik santrallerde kullanım amacıyla üretimi ekonomik olan %65'ini oluşturan 5,4 milyar tonunun o zamana kadar geride kalmış olacak olan yaklaşık 4 milyar tonu, izleyen 25 yıl içerisinde tükenecek. Ama iyi ki de varmış. Aksi halde çok daha zor bir durumda olurduk.

Doğalgaza dayalı birleşik (kombine) döngü santrallerinda üretilen elektriğin büyük bir kısmı, doğalgazın yakılmasıyla oluşan sıcak gazların bir gaz türbinini döndürmesiyle (Brayton döngüsü) elde edilir. Ayrıca, bu türbinin çıkışındaki sıcak gazların ısısıyla su buharı oluşturulup, bir de buhar döngüsü kullanılarak, ek bir miktar daha elektrik üretilir. Dolayısıyla, bu tip santrallerin verimi, sadece buhar döngüsüne dayalı olarak çalışanlarınkine göre daha yüksek olup, %45-50'ye ulaşabilir: Diyelim %45. Öte yandan, doğalgazın hacimsel enerji yoğunluğu, m^3 başına 39 MJ kadardır. Yani özkütlesi, 0°C sıcaklık ve 1 atmosfer basınç altında, bileşimine bağlı olarak 0,7-0,8 kg/m^3 arasında değiştiğinden; kütlesel enerji yoğunluğu 49-56 MJ/kg kadar. O halde, yukarıdaki; yıl boyunca %75 emreamadelikle çalışıp 6,13 milyar kWh elektrik üreten 1000 MW(e)'lik santral, yılda; 30MJ/kg yoğunluklu 2,21 milyon ton kömür yerine; 39MJ/m^3 yoğunluklu doğalgazdan, 2,21x(30/39)x[(l/3)/0,45]=l,26 milyar metreküp yakmak zorundadır. Yani, doğalgazın metreküpü başına 6,13/1,26=4,87 kWh üretmektedir. Ya da kWh başına 0,21 metreküpünü tüketmekte...

Doğalgaz, görece yüksek verimi ve daha az kirletici yayması nedenleriyle, özellikle son 20 yılda Dünya'da hızla yayıldı. Türkiye de bu eğilimin içerisinde. 2006 yılı için 173,1 milyar kWh olarak gerçekleşmesi beklenen elektrik üretiminin, %43,8'ine karşılık gelen 70,5 milyar kWh'ini doğalgazdan sağlamayı planlıyor. Bunu için, 70,5x0,21=14,8 milyar metreküp gaz tüketecek. Halen, tükettiğimiz doğalgazın %57,4'ü elektrik üretiminde kullanılıyoruz. Dolayısıyla, bu yılki toplam ithalat, 14,8/0,574=25,8 milyar metreküpü aşacak. Bin metreküpü 270 dolardan, faturası; (25,8/1000)x270=6,98 milyar dolar. Diyelim 7 milyar dolar: Yılda... Gelecekte, ithalat hacmiyle birlikte fiyat artacak ve bu rakam yükselecek.

Elektriği kullanır ve enerji tüketirken, ara sıra bunları hatırlamamızda yarar var.

KÖMÜRÜN DİLİ OLSA...

Bilindiği üzere kömür, petrol ve doğalgaz ‘fosil yakıt’ olarak nitelendiriliyor. Nedeni, haklarında bilinenlerin ağırlıklı olarak, canlı organizmaların fosil kalıntılarından oluştuklarına işaret ediyor olması. Örneğin kömür, ‘biyoloji kökenli oluşum kuramı’na (*biogenesis*) göre; bir zamanlar göl ve bataklıklarda birikip ‘turbalık’ları oluşturan bitki kalıntılarının, kil ve lığ gibi tortu akıntılarıyla karışıp onlarla örtüldükten sonra, yerkabuğu plakalarının hareketleri sonucunda derinlere gömülerek, alt katmanlardaki yüksek sıcaklık ve basınç ortamında, uzun süreli fiziksel ve kimyasal değişikliğe uğramış hali. Bu süreç, bundan 360-290 milyon yıl öncesindeki zaman aralığını kapsayan ve ‘birinci kömür devri’ olarak da anılan Karbonifer Dönem’de yer almış.

Oluşan kömürün kalitesi sıcaklığa, basınca ve ‘organik olgunluk’ denilen oluşum sürecinin uzunluğuna bağlı olarak değişiyor. Çünkü süreç uzadıkça, kömürün katı yapısında sabitlenen karbon oranı artarken, bünyesinde emilmiş halde bulunan uçucu bileşenlerin oranı azalmış. Dolayısıyla, turbalıklar önce, organik olgunluğu düşük olan linyit veya ‘kahverengi kömür’e dönüşmüş. Sonra, basınç ve sıcaklık etkilerinin milyonlarca yıl daha sürmesi, linyiti giderek, ‘az katranlı’ (alt bitümlü) kömür haline getirmiş. Değişimi zorlayan koşulların devamı, katranlı (bitümlü) kömürle sonuçlanmış. Nihayet, uygun koşulları yakalayan birikimlerin organik olgunluğu arttıkça, camsı bir yapıya sahip olan ‘parlak kömür’ (antrasit) oluşmuş. ‘Az katranlı, katranlı ve parlak’ kömürlere; renkleri daha koyu olduğu için ‘siyah kömür’ veya daha sert oldukları için ‘taşkömürü’ de deniyor. Oluşumun en erken aşama ürünü olan linyit, düşük karbon ve yüksek nem oranına sahip. Dolayısıyla enerji yoğunluğu en düşük olanı. Birim ağırlık başına enerji içeriği, kaliteli bir taşkömürününkinin dörtte birine kadar inebiliyor.

Kömürü sınıflandırmanın değişik yöntemleri var. En yaygın olarak kullanılanı, Amerikan malzeme testleri kuruluşu ASTM’nin (American Society for Testing of Materials) 1921 yılında belirlemiş olduğu, kömürün içerdiği sabit karbon ve uçucu bileşiklerin oranlarına dayalı sınıflandırma biçimi. Aşağıdaki tabloda bu sınıflandırma, kütlesel enerji yoğunluklarıyla birlikte veriliyor.

ASTM sınıf	ASTM grup	MJ/kg
Linyit	Linyit A	<14,6
	Linyit B	14,6-19,3
Az katranlı *(Sub-bituminous)*	Az katranlı C	19,3-22,1
	Az katranlı B	22,1-24,4
	Az katranlı A	24,4-26,7
	Fazla uçuculu C	26,7-30,2
Katranlı *(Bituminous)*	Fazla uçuculu B	30,2-32,5
	Fazla uçuculu A	>32,5
	Orta uçuculu	>32,5
	Düşük uçuculu	>32,5
Parlak kömür *(antrasit)*	Yarıparlak *(semi-anthracite)*	>32,5
	Parlak	>32,5
	Parlakötesi *(meta-anthracite)*	>32,5

Toprak yüzeyine çıkmış kömür parçalarının Bronz Çağı'nda cenaze törenlerinde ateş yakmak için kullanıldığına dair arkeoloji kanıtları var. Madenciliği Roma döneminden beri yapılıyor. Amerika'da ilk kez Aztekler tarafından ve sadece yakıt olarak değil, süs eşyası olarak da kullanılmış. Ancak kömüre asıl talep 17. yüzyılın ikinci yarısında, buhar makinesinin keşfinin tetiklediği Sanayi Devrimi'yle birlikte doğdu. 18. yüzyılın ikinci yarısına kadar, sanayi üretimi ve ısınmada en önemli enerji kaynağı kömürdü. Dünya'nın bilinen kömür rezervlerinde en büyük paya sahip olan ülkeler; ABD (%26), Rusya Federasyonu (%16), Çin (%12), Hindistan (%9) ve Avusturalya (%8).

Birikimler, çökelti türü diğer kayaç katmanları arasında sıkışmış halde bulunuyor. Yatak kalınlıkları 1 mm'den az olabildiği gibi, 'damar' olarak nitelendirilen görece kalın katmanlarda birkaç metreyi bulabiliyor. Yerüstü (veya açık kesim) ve yeraltı (veya derin) olmak üzere, iki tür kömür madenciliği var. Birincisi, adı üzerinde, yüzeye yakın rezervler için uygulanıyor ve damarların üzerindeki toprak veya kaya katmanı, gerektiğinde aralıklı olarak oyulan deliklere yerleştirilen patlayıcıların patlatılmasıyla parçalanıp açıldıktan sonra, alttaki kömür dev kazıcılarla çıkartılıyor. Hem de güvenlik riskleri daha düşük olan bu yöntemle, rezervin %90'dan fazlasını çıkartmak mümkün. Fakat kömürün tonu başına, ortalama 25 ton yüzey malzemesinin kaldırılması gerektiğinden çevresel etkileri görece daha ağır. İşletme sonucunda yüzeyde kalan atıklar ve açığa çıkan kayalar, özellikle de pirit gibi kükürtçe zengin mineraller içermeleri halinde, yağışlarla gelen suda çözünerek, demir mineralince zengin sülfürik asit çözeltileri oluşturuyor. 'Asitli maden sızıntısı' denilen bu çözelti, topraktaki bakır, kurşun ve cıva gibi ağır metalleri çözerek beraberinde götürüp, yeraltı sularına karışabilmekte.

Yeraltı madenciliği ise önce damara inen bir tünel açıldıktan sonra, 'galeri' ya da 'oda ve sütun' yöntemleriyle yapılıyor. Oda ve sütun yönteminde damar, yan yana ve uç uca odalar ağı şeklinde kazılıp, aralarında tavanın ağırlığını taşıması için kömür sütunları bırakılıyor. Geride kalan bu sütunlar, damardaki rezervin %40'ına karşılık gelebilmekte. Gerçi bazen sonradan çıkartılmaları mümkün olabiliyor. Tabii sonuç olarak, madenin üzerindeki yüzey topografyasında bir miktar çökmenin yer alması kaçınılmaz. Karabük, Zonguldak'ta olduğu gibi. Galeri yönteminde ise örneğin eni 250-400 m, boyu 3-4 km'yi bulan bir yeraltı damar paneli, dar kenarlarından birinden başlanarak, enine şeritler halinde çıkartılıyor. Bunun için, panelin o dar kenarı boyunca 400 m kadar uzanan bir galeri açılıp, tavanı hidrolik kaldıraçlarla destekleniyor. Kömürün açığa çıkan yüzü, galeri boyunca ileri geri hareket eden mekanik kazıyıcılar tarafından parçalanıp, kayar kayışlarla yüzeye naklediliyor. Kazıcılar panelin görece ince bir dilimini oyup, tavan desteklerinden 5-6 m kadar uzaklaştıktan sonra, hidrolik kaldıraçlar kendiliklerinden tahrikli olarak ilerleyip, kömürü alınmış olan kısmı geride bırakarak, tavanının çökmesine izin veriyor. Böylelikle, damarın hep enlemesine uzanan galeri şeridi, uzun kenar boyunca ilerleyip duruyor. Bu yöntemin uygulandığı damar veya damar kısmındaki kömürün %75'ten fazlasının çıkartmak mümkün. Ancak damarın ve civarındaki katman yapısının, bu yönteme uygun jeolojik yapıya sahip olması lazım. Dünya'daki kömürün %60'ı bu yöntemle çıkarılmakta. Fakat, yeraltı madenciliği çoğu kez pahalı ve yüzeydekinden daha riskli.

Kömürün bünyesinde emilmiş halde bulunan uçucu bileşenlerden biri de metan. Madenin işletilmesi sırasında, damarın görünen alnından sızıp galerilerde birikebiliyor. Yanma sıcaklığı 630°C. Havadaki hacim oranı %5,4-14 arasındayken patlayıcı bir karışım oluşturuyor ve kömürü sıyırmakta kullanılan kesici uçların fırlattığı sıcak metal parçalarıyla temasa geldiğinde, grizu patlaması olarak bilinen patlamalara yol açabiliyor. En patlayıcı karışım oranı %9,8. En kolay tutuşanı %7,5. Havada ayrıca kömür tozları varsa eğer, bunlar da yanma sürecine katılıp, patlamanın şiddetini artırıyor. Dolayısıyla, madenin iyi havalandırılması, kömür tozlarının filtrelenip, galerilerdeki metan yoğunluğunun sistemli bir şekilde izlenmesi gerekli.

Bu olgunun bilinmediği 18. yüzyılda, özellikle İngiltere'deki kömür madenlerinde, uygun metan karışımının oluştuğu her seferinde patlamalar oluyor ve madenciler ölüyordu. Hele de galerilerdeki çalışma alanlarını aydınlatmak için açık alevli lambalar kullanıldığından... Madencinin ömrü büyük olasılıkla bir sonraki patlamaya kadardı ve tek kurtuluş yolu, mesleği ilk fırsatta terk etmekti. 1816 yılında Sir Humphry Davy, kendi adıyla anılan 'madenci lambası'nı geliştirdi. Bu lambada alev, tül gibi ince örgülü bir tel kafesin içerisinde yanmaktaydı. Kafesin aralıkları havanın içeri girmesine, ışığın da dışarıya sızmasına imkân tanıyor, fakat alevin dışarı taşmasına engel oluyordu. Lambanın sönmesi, havadaki oksijen miktarının azaldığı, yani patlamaya hazırlanan gaz miktarının arttığı anlamına geldiğinden, uyarı niteliği taşımaktaydı. Madencilerin bu durumda, işi bırakıp madeni bir an önce terk etmesi gerekiyordu. Karanlıkta birbirine ve etrafa çarpmadan...

Metan gazı ölçümleri artık, sabit veya gezici 'metanölçer'ler aracılığıyla yapılıyor. En yaygın kullanılan algılayıcılar, Wheatstone Köprüsü düzeninde bağlanmış ince iki telden oluşmakta. Tellerden birisi, gözenekli olan yüzeyinin içi katalizör kaplı minik bir boncuğun içinde, elektrikle ısıtılmış halde. Öyle ki, kendisiyle temasa gelen metan molekülleri, katalizörün de yardımıyla yanıp, telin sıcaklığını daha da artırıyor. Bu telin, sıcaklığıyla birlikte artan direncini, ısıtılmamış olan diğer telinkiyle kıyaslayarak, havadaki metan oranını belirlemek mümkün. Sabit aygıtlardan gelen veriler, otomasyonlu madenlerde kontrol odasından izleniyor. Havadaki metan oranı %1,25'i bulduğunda işe ara verilip makineler durdurulurken, %2,5'e ulaştığında yangın veya patlama tehlikesine karşı alarm verilip personel geri çekiliyor ta ki, yoğunluk ölçümleri güvenli sayılan %0,25 sınırının altına inene kadar.

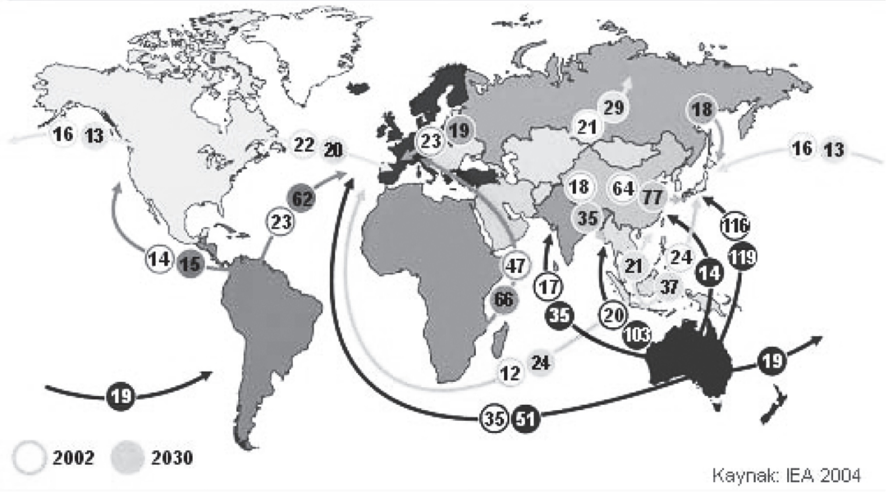
Metan gazına karşı alınması düşünülen bir önlem de, damarın işletmeye alınmasından 5 ila 6 yıl öncesinden başlayarak, içine aralıklı yatay delikler açıp, bünyesindeki metanı sızdırmak. Ekonomikliği henüz belirsiz, akılcı bir çözüm. Avusturalya'da bu 'gazsızlaştırma' yöntemiyle elde edilecek metan gazının, elektrik santrallerinde kullanılması projesi var.

Alınan tüm önlemlere karşın, zaman zaman, patlamalar, göçükler ve ölümler gerçekleşiyor. Galerilerdeki kömür tozlarının artık filtreleniyor olması, solunmalarının akciğerlerde yol açtığı 'nefes darlığı' (*emfezima*), 'akut bronşit' ve 'siyah ciğer hastalığı' (*pneumoconioses*) gibi madencileri tehdit eden 'meslek hastalıkları'nı büyük oranda azalttı. Fakat kömür madenciliği hâlâ, en riskli mesleklerden birisi. Gerçi enerji üretimi ve kaynaklarını elde süreçleri, genelde riskli uğraşlar. Seradan domates toplamaya pek benzemiyorlar. Fakat kömür madeni kazalarında her yıl 10.000'den fazla insan ölüyor. Bunun yarısı, kömürün üretiminde ve tüketiminde dünya lideri olan Çin'deki kömür madenlerinde. Haftada 110 kişi... Hatta köy ve kasabalardaki küçük madenlerde yer alan ve kapatılma endişesiyle bildirilmeyen kazalar da hesaba katılırsa, bunun iki misli kadar. Üretilen milyon ton kömür başına insan kaybı, gelişmiş ülkelerde, gelişmekte olanlara oranla çok daha düşük: Çin'de 6,36 iken, ABD'de 0,05 ve Avustralya'da 0,02.

En büyük üreticiler sırasıyla Çin, ABD, Hindistan, Avusturalya ve Güney Afrika. Bunların ilk üçü, aynı zamanda en büyük tüketiciler. İşçi başına yıllık üretim, madendeki makineleşme düzeyine, dolayısıyla da yapılan yatırım miktarına bağlı. Avusturalya ve ABD'de 13 bin ton civarında, Çin'de ise 400 ton kadar.

Kömür, maden alanı içerisinde, dev araçlar veya taşıyıcı kayışlarla taşınıp, yığınlar halinde biriktiriliyor. Madenden nakli, kısa mesafelere karayolu, orta mesafelere demiryoluyla yapılmakta. Uzun mesafelere taşınması ve uluslararası ticareti ise ağırlıklı olarak deniz ulaşımıyla. Başlıca kullanım alanları elektrik üretimi, demir çelik sanayisi ve ısınma. Kül artıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanımı da önemli. Dünya birincil enerji üretiminin %22'si, elektrik üretiminin de yaklaşık %39'u kömüre dayalı. Buhar gücüyle çalışan bu santrallerde kullanılan kömüre, buhar üretmek amacıyla kullanıldığından 'buhar kömürü' de deniyor. Özellikle linyit hemen yalnızca bu alanda ve ısıtmada kullanılmakta. Taşkömüründen elde edilen kok ise demir çelik sanayisinde önemli bir girdi. Kok kömürü, kül oranı ve kükürt içeriği düşük olan katranlı kömürlerden türetilen, katı bir karbonlu yapı. Taşkömürünün 1.000°C'ye varan sıcaklıklarda oksijensiz ortamda fırınlanarak, uçucu safsızlıklarından ve neminden arındırılıp, içeriğindeki karbon ve kalıcı külün birleşmesinin sağlanmasıyla elde ediliyor. Gri renkli, sert ve gözenekli bir yapıya sahip. 29,6 MJ/kg'ı bulan kütlesel enerji yoğunluğuyla, demir cevherinin eritildiği 'hava akımı' (*blast*) fırınlarında, ısı kaynağı ve indirgeme unsuru olarak kullanılıyor. Gerçi 'tozlaştırılmış kömür püskürtme' (*pulverised coal injection, PCI*) tekniğiyle, kömürü demir çelik üretiminde doğrudan kullanmak da mümkün. Ancak, Dünya ham çelik üretiminin üçte ikisi 'hava akımlı' fırınlarda yapılıyor ve bu

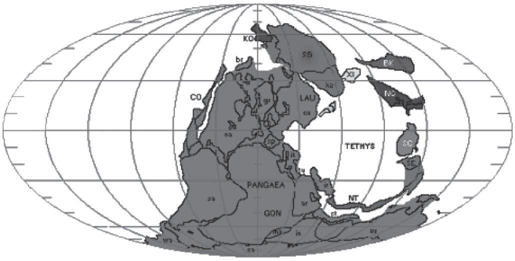
Dünya Kömür Ticaretinde Bölgelerarası Ana Akışlar, 2002-2030 (Mt)



Kaynak: IEA 2004

üretimin her tonu için 0,63 ton kok kömürü gerekiyor. Üretimin üçte biri ise, %100 geri dönüşümlü olan bu metalin hurdasının, elektrik ark ocaklarında yeniden işlenmesine dayalı. 2003 yılında 965 milyon tonu bulan toplam çelik üretimi için 543 Mt kömür harcanmış.

Dünya kömür üretimi halen yılda 5,3 milyar ton kadar. Çoğunlukla üretildiği yerlerde tüketilmekte, %75'i elektrik üretiminde kullanılıyor. Yalnızca %18 kadarı uluslararası ticarete konu. En fazla ihracat yapan ülkeler 200 Mt'la Avusturalya, 90 Mt'la Çin. En büyük ithalatçılar Japonya, Güney Kore ve Tayvan. 2003 yılında el değiştiren 700 Mt kömürün %90 kadarı deniz yoluyla taşınmış. Nakliye ücreti bazen maliyetin %70'ini buluyor. Bu biraz da, deniz taşımacılığının iniş çıkışlı yapısından kaynaklanan bir durum. Dünya ekonomisinin durgunluğa girdiği dönemde daralan deniz taşımacılığı filoları, ekonominin büyümeye başlamasıyla birlikte artan talebi karşılamakta zorlanınca, navlun ücretleri iki ve hatta üç misline katlanabilmekte. Aşağıdaki şekilde, Dünya kömür ticaretindeki bölgeler arası ana akışlar gösteriliyor. Diğer çizimde de yerkabuğu plakalarının 300 milyon yıl önceki, kömür rezervlerinin oluştuğu karbonifer döneme rastlayan, süperkıta Gondvranaland'a vücut vermiş olan dizilimi var. Tevekkeli kömür rezervleri Dünya üzerinde, petrole oranla daha homojen bir dağılıma sahip. Fakat ilginç bir şekilde, Ortadoğu'da hemen hiç yok. Latin Amerika'da ise, yok denecek kadar az. Neden dersiniz? Keşke kömürün dili olsa da anlatsa...


KO
br
SB
BK
XI
kz
CO
gr
LAU
NC
eu
na
sp
TETHYS
SC
it
SE
PANGAEA
sa
ar
NT
GON
ct
ma
in
au
wa
ea

“Biz o zaman kardeşim, şeydeydik... Sonra üstümüze yavaş yavaş, kilometrelerce kalınlığında ağır kayalar tırmandı. Altında kaldık. Ama ne basınç: Binlerce atmosfer! Sıcaklık desen: Bin küsur santigrad!... Öyle bir iki günlüğüne de değil, milyonlarca yıl. Oksijen de yok ki, yanıp kül olup kurtulasın. Çekmediğimiz kalmadı, bu hale geldik. Neyse şimdi fırına gidiyoruz da, ooh, kurtulacağız...”

Petrol ve doğalgazın da benzer bir öyküsü var...

PETROL...

‘Petrol’ sözcüğü, Grekçe’de ‘kaya’ anlamına gelen *petra* sözcüğüyle ‘yağ’ anlamına gelen *elaion* veya Latince *oleum* sözcüklerinin birleşimi ve ‘kaya yağı’ anlamına geliyor. Yerkabuğunun bazı bölgelerinde üst kaya katmanlarında var. Doğadaki haline, rafine edilmiş olanından ayırt etmek için ‘ham petroller’ deniyor. Çoğul, çünkü görünüşü ve bileşimi hayli değişken. Çoğunlukla halkalı (aromatik) yapılar barındırmayan, tekli karbon karbon bağlarının düz veya dallanıp budaklanan zincirlerinden (alifatik) oluşan, metan ve etan benzeri doymuş hidrokarbonların (alkanlar) karmaşık bir bileşiminden oluşuyor. Azot, oksijen ve kükürt bileşenlerini de safsızlık olarak içermekte. Fiziksel özellikleri, keza hayli değişken ve halk arasında yaygın olan kanının aksine; katı, sıvı veya gaz halinde olabiliyor. Yüksek graviteli olarak nitelendirilen hafif petroller, genellikle açık kahve, sarı ya da yeşil; düşük graviteli ağır petroller ise, koyu kahverengi veya siyah renkli.

Oluşumu hakkında değişik kuramlar var. Jeologlar arasında en yaygın kabul göreni, biyoloji kökenli biyojenik veya organik kuram. Bu kurama göre petrolün kökeni, milyonlarca yıl önce yaşamış olan minik deniz hayvanlarıyla tek hücreli yosunların (algler) kalıntılarına dayanıyor. Çünkü içeriğinde böyle kalıntılar var. Bu kalıntılar, deniz dibine çöküp çamurla karıştıktan ve oksijensiz ortamda çürüyerek bozunduktan sonra, üstlerinde biriken kalın tortul katmanlarının altına gömülmüş. Oluşan organik malzeme, jeolojik zaman ölçeğine yaygın olarak çalışan basınç ve ısı etkilerin altında yapısal dönüşüme (metamorfoz) uğrayarak petrole vücut vermiş. Yüksek sıcaklık ve basınç, kalıntıların önce, ‘kerogen’ denilen mumsu bir malzemeye, sonra da ‘katagenez’ denilen bir süreçle, sıvı ve gaz hidrokarbonlara dönüşmesine yol açmış.

Kerogen diye genel olarak, tortul kayaların bileşiminde genellikle var olan organik malzemenin bir kısmını oluşturan, mumsu yapıdaki katı maddeye deniyor. Bini aşan dev molekül ağırlığı nedeniyle sıradan organik çözücülerde çözünmeyen kimyasal bileşiklerden oluşmakta. Çözünebilen kısmı, ‘bitüm’ denilen katran türü. Gerçi bitüme doğada da rastlanıyor. ‘Katagenez’ ise, bu organik kerogen malzemenin, petrol ve doğalgaz gibi hidrokarbonlara dönüştüren 'molekül parçalanması' süreci. Sürecin başlangıçtaki kerogen malzemesinin, hızları sıcaklık ve özellikle de basınca bağlı olan tepkime sabitlerinin büyüklüğüyle belirlenen paralel bir dizi parçalanma tepkimesi sonucunda, zamanla hidrokarbonlara dönüştürdüğü düşünülüyor. Nitekim, bu kerogen malzemesi, hidrokarbon oluşum sürecinin erken bir aşamasında donup kalmış olduğu sanılan 'katranlı kumullar'da (*tar sands*) ve 'yapraktaşı yağları'nda (*shale oil*) da var.

Katagenez sürecinin çalıştığı ve jeologların 'sıcaklık penceresi' olarak adlandırdığı, belli bir sıcaklık aralığı var. Sıcaklık yeraltında derinlere inildikçe arttığından, bu sıcaklık aralığına bir derinlik aralığı karşılık gelmekte. Yerkabuğundaki sıcaklık coğrafi konuma göre değilebildiğinden, tipik petrol derinliği 4 ila 6 km arasında. Ancak oluşan hidrokarbonlar, içinde oluştukları bu derinliklerdeki 'kaynak kayaç'tan, yüksek basınç nedeniyle damlalar halinde sızarak, kaya yapılarından daha az yoğun olduklarından dolayı, geçit buldukça yükselirler ve eğer civarda varsa daha gözenekli bir yapıya sahip olan bir 'hazne kayaç' ya da 'rezervuar'a göç ederler. Bu katmanın gözenekleri arasındaki dikey geçitlerden yukarı doğru sızarak tırmanır ve geçirgen olmayan bir katmana rastladıklarında sıkışıp kalırlar. Böyle geçirimsiz bir 'örtü kayaç'ın altındaki gözenekli yapıda sıkışmış bulunan, sıvı ve biraz da gaz fazlarının karışımı halindeki sulu hidrokarbon birikintisine 'petrol rezervi' denmekte.

Kısacası, bir coğrafya konumunda petrol rezervinin bulunması için üç unsurun bir arada var olması gerekiyor: Altta kaynak oluşturan bir katman, arada tırmanma kanalları barındıran gözenekli bir hazne kayaç ve üstte petrolü oluşturan hidrokarbonların yükselerek kaçmasını engelleyen geçirimsiz bir örtü kayaç. Hazne kayaç içerisindeki hidrokarbonlar yoğunluklarına göre, yukarıdan aşağıya doğru, gaz ve ham petrol şeklinde sıralıdır. En altta ise su bulunur. Örtü kayaçla karşılaşamadığı durumlarda, petrol yüzeye ulaştıkça, oksijenin varlığında zamanla yanar.

Petrolün bir de; Eski Sovyetler Birliği döneminde Nikolai Kudryavtsev tarafından geliştirilmiş ve Batıda da Avusturyalı astrofizikçi Thomas Gold'un başını çektiği bir grup bilim insanı tarafından savunulmuş olan, 'biyoloji kökenli olmayan' (*abiyojenik*) bir oluşum kuramı var. Bu kurama göre gezegenimizde doğal olarak, bir kısmı hidrokarbonlar şeklinde olmak üzere, büyük miktarlarda karbon bulunmakta. Hidrokarbonlar, diğer sulu gözenek akışkanlarından daha az yoğun olduklarından, derin çatlak ağlarından yukarıya doğru yükseliyorlar. Yolda karşılaştıkları kayalarda yaşayan 'sıcaklığa düşkün' (*termofilik*) bakterilerin kalıntılarını bünyelerine katmaları, petrolde rastlanan 'biyolojik işaretler'in kısmi nedenini oluşturmakta. Kuram ayrıca, petrol biliminde daha önce açıklanamamış olan bazı problemleri, örneğin doğal petrolde gözlemlenen optik etkinliğin asıl ve içsel (*intrinsic*) bileşenini, farklı derinliklerdeki petrol haznelerinin eser element özelliklerini başarıyla açıklıyor. Öte yandan, kuram savunucularına göre, akademik bir öneri olmaktan çıkmış bir halde. Kiev'deki Jeoloji Bilimleri Enstitüsü'nde çalışan Ukraynalı dört bilim insanının[1] bu kurama dayalı olarak başlattıkları petrol aramalarının, özellikle de Dinyeper-Don Havzası'ndaki petrol ve gaz alanlarının keşfedilip geliştirilmesine bulundukları katkıların; 1951 yılına kadar 'petrol fakiri' sayılan Rusya'yı bugün dünyanın en büyük petrol üreticisi ve ihracatçısı durumuna getirmiş olduğu yönünde görüşler var. Bu yüzden, söz konusu dört bilim insanına 1993 yılında 'Bilim ve Teknoloji Alanında Ukrayna Devlet Ödülü' verildi. Fakat yine de bu kuram, özellikle Batılı bilim insanları arasında bir azınlık görüşü oluşturmakta. Konu gündeme, bazı havzalarda bazen beklenmedik ilave petrol sızıntılanyla karşılaşıldığında gündeme geliyor. Böyle durumlar kuramın karşıtları tarafından 'jeolojik gariplikler' olarak nitelendirilmekte. Bilindiği kadarıyla, Batılı şirketlerin hiçbirisi aramalarını bu kurama dayandırmıyor.

Her halükârda petrol, çoğu kez sanıldığı gibi yeraltında göller halinde değil, uygun kayaç katmanlarının gözeneklerinde gizlidir. Bu kayaç tıpkı, su emdirilmiş bir süngerin plastik bir poşetin içine konduktan sonra, poşetin ağzının iyice bağlanıp olabildiğince sıkılmış halinde olduğu gibidir. Rezervin aranması sürecinde, önce petrol barınağı olmaya uygun görünen jeolojik biçimlenmeler belirlenir. Petrolün ve de gözenekli hazne kayacın yoğunluğunun görece düşük olması, yerçekimi sabitinin rezerv yöresindeki değerinin biraz düşük olmasını gerektirmektedir. Durumun böyle olup olmadığını anlamak için gravimetreler kullanılır. Öte yandan, en dıştaki örtü kayacın demir minerali içerme olasılığı yüksektir. Bu mineral ise, yerin manyetik alanında mıknatıslabilir olduğundan, ek bir manyetik alana yol açıyor. Dolayısıyla, aday bölgelerdeki doğal manyetik alan şiddetleri, manyetometreler ile ölçülüyor. Toplanan veriler, petrolün varlığına dair güçlü bir olasılığa işaret ediyorsa, sıra kuyu açmaya gelmiş demektir.

---

[1] V. A. Krayushkin, T. I. Tchebanenko, V. P. Klochko, Ye. S. Dvoryanin.

Kalınlığı ortalama 50 m civarında olan örtü kayaçta bir kuyu açılıp da atmosfer basıncı aşağıya sarkıtıldığında, gözeneklerde bulunan görece yüksek basınç altındaki petrol, kuyudaki düşük basınca doğru sızmaya başlar. Hazne başlangıçta basınç altında olduğundan, petrol bir süre için kendiliğinden yükselip yüzeye ulaşabilir. Bu durumda, haznenin çeşitli noktalarında kuyular açıp, kuyu ağızlarını toplayıcı boru hattı ağına bağlamak yeterlidir. Kuyular birbirine fazla yakın olursa, kuyu başına verim düşer. Kuyu açmak zaten pahalı bir işlemdir. Öte yandan az sayıda kuyu, toplam üretim hızının düşük olması anlamına gelir. Dolayısıyla, haznenin topografyasına, kayaç katmanlarının yapısına, petrolün difüzyon katsayısına ve yoğunluk gibi diğer fiziksel özelliklerine bağlı olarak matematiksel bir model hazırlanıp incelenir ve açılacak optimal kuyu sayısı önceden belirlenir.

Petrol eğer akışkansa (viskozitesi düşük) kuyu başına verim (varil/gün) yüksektir. Fakat haznedeki petrol azaldıkça gözenekli yapı rahatlar, basıncı düşer ve petrol zerrecikleri daha yavaş sızmaya başlar. Kuyu verimi düşmüştür. Buraya kadarki aşamaya 'birincil çıkartma' deniyor. Birincil çıkartma yöntemiyle, haznedeki petrolün ancak %20 kadarı çıkartılabilir.

Bundan sonra 'ikincil çıkartma yöntemleri'ne başvurulması, örneğin devreye pompalama gücünün sokulması lazımdır. Bu işlev, petrol alanlarında sıkça görülen ve bir elektrik motoruyla çalıştırılan 'tahtarevalli pompa', ya da kuyu dibine indirilen elektrikli dalgıç pompalar tarafından sağlanır. Ayrıca ek kuyular açılarak ya da eski kuyulardan bazıları kapatılarak, bunlardan içeri su pompalanır. Amaç, hazne kayaçtaki basıncı artırarak petrol zerrreciklerini daha hızlı harekete zorlayıp yeryüzüne çıkmalarına yardımcı olmaktır. Pompalanan su sıcak olursa daha etkilidir. $C0_2$ enjeksiyonu veya petrolle birlikte çıkmış olan doğalgazın geri pompalanması, daha da iyi sonuç verir. Fakat gazı pompalamak zor ve pahalıdır. Birincil ve ikincil çıkartma yöntemleri birlikte, haznedeki petrolün %25-35'ini çıkartabilir. Sıra 'üçüncül çıkartma yöntemleri'nin uygulanmasına gelmiştir.

Üçüncül çıkarma yöntemleri, pahalı işlemler oluşturduklarından, ekonomik bulundukları takdirde uygulanırlar. Bu yöntemlerle çalıştırılan kuyular, petrol fiyatlarının düşük olduğu dönemlerde kapatılıp, fiyatlar yükseldiğinde tekrar işletmeye alınır. Yöntemler, petrolün akışkanlığını artırmaya yöneliktir. Bu amaçla, *surfaktan* denilen ve petrol zerreciklerinin yüzey gerilimini azaltıp akışkanlığını artıran kimyasallar veya aynı işlevi yerine getiren bakteriler kullanılır. Ya da ‘petrolün çıkarılmasını ısıyla kolaylaştırma’ (*thermally enhanced oil recovery, TEOR*) tekniklerine başvurulur. En sık kullanılan yöntem, ikincil kuyulara su buharı enjeksiyonudur. Bu genellikle, ısı ve elektriğin birlikte üretildiği bir ‘eşüretim’ (*kojenerasyon*) santralının yardımıyla yapılır. Santraldaki gaz türbinleri elektrik üretirken oluşan atık ısı, buhar üretimine yönlendirilmekte ve elde edilen buhar, hazneye pompalanmaktadır. Santralın kullandığı doğalgaz bazen, petrolle birlikte çıkan doğalgazın kendisidir. ‘Yerinde yakma tekniği’, petrolün çıkartılmasını ısıyla kolaylaştırmanın bir diğer yöntemidir. Bu yöntemde, haznedeki petrolün bir kısmı yerinde yakılır ve kalan kısmının ısınıp akışkanlığının artması sağlanır. Üçüncül yöntemlerle, petrolün %5-15 kadarını daha çıkarmak mümkün: Toplam olarak %50 kadarını.

Petrolün katı veya yarıkatı halleri doğada, örneğin asfaltit, yüzeyel yataklar halinde de bulunuyor. Bilinen en eski asfaltit yatakları Ölü Deniz’in kuzeyindeki Yeriko kentinde. Milattan önceki dönemde, kerpiç evlerin yapımında, tuğlalar arasında yapıştırıcı harç malzemesi olarak, ayrıca gemilerde sızdırmazlık ve suya karşı yalıtım amaçlarıyla kullanılmış. Yeriko aynı zamanda ve belki de bu yüzden, Dünya’nın içinde halen yaşanılan ve kesintisiz yerleşime tabi olmuş en eski kenti. Buradan çıkartılan asfaltitin yakın coğrafyalara satıldığı ve hatta Fenikeliler tarafından deniz yoluyla Kartaca’ya kadar taşındığı sanılıyor. Romalıların çoğunlukla kerpiçten yapılmış bir Kartaca’yı yakıp yerle bir etmesini kolaylaştıran bir unsurun, tuğlalarının arasındaki asfaltit olduğu sanılmakta.

En eski petrol kuyusu, 4. yüzyıldan önce Çin’de bir kamışın ucuna aşındırıcı bir metal parçası takıp, diğer ucundan tutup döndürerek ve aşındırıcı uç derine indikçe, üstteki uca başka kamışlar ekleyerek açılmış. Halen yapılmakta olana benzer şekilde. Kuyuların derinliği 243 metreyi buluyor. Çinliler petrolü yakıp, deniz suyundaki suyu buharlaştırıp tuz elde etmek için kullanmışlar. 10. yüzyıla gelindiğinde, çeşitli tuz üretim merkezlerinin birbirlerine yine kamıştan yapılmış boru hatlarıyla bağlanmış olduğu görülüyor.

Ortadoğu’da ise eski Pers tabletleri, toplumun üst katmanlarında petrolün, tıp uygulamalarında ve aydınlatma amacıyla kerosen eldesi için kullanıldığından bahseder. İran, ateş yakmanın *Homo Sapiens*’ler arasında erken bir aşamada keşfedilip kullanılmaya başlandığına dair kanıtlar barındıran ilginç bir coğrafya. Yüzeyel petrol yatakları, Ahura Mazda inanışının (Zerdüştlük) ateşi simge olarak kabulünü tetikleyip yayılmasına yardımcı olmuş ve ateş tapınaklarını ayakta tutmuş olabilir. Öte yandan, 'bitüm' sözcüğünün Persçe karşılığı *mumiye.* Bu sözcük daha sonra Arapça'ya *mumya,* bir olasılıkla oradan da İngilizce'ye *mummy* olarak geçmiş. Bugünkü kullanımındaki anlamı Arapların, sargısı açılmış mumyaların ten renginin siyah olması nedeniyle, Eski Mısırlıların mumyalama süreci sırasında bedeni dezenfekte etmek için bitüm kullandığını düşünmüş olmalarından kaynaklanıyor.

8. yüzyılda Abbasiler, yeni başkentleri olarak inşa ettikleri Bağdat'ın sokaklarını, bölgedeki yüzeyel alanlardan elde ettikleri petrolü damıtarak ürettikleri katranla kaplamış. 9. yüzyılda Azerbaycan'ın Baku kenti civarındaki petrol alanları, nafta eldesi için kullanıma açılmış. 10. yüzyıl coğrafyacısı Mesudi, anlatımlarında bu alanlardan bahseder. 13. yüzyıldaysa Marko Polo çıkartılan petrolün 'yüzlerce gemi dolusu' olduğunu söyler.

Fakat petrolün çağdaş tarihi, Polonyalı Ignacy Lukasiewicz'in 1852 yılında, daha önceleri kömürün damıtılmasıyla elde edilmekte olan keroseni, daha kolay bulunabilen petrolden damıtmanın yöntemini keşfiyle başlar. İlk petrol kuyuları ertesi yıl, Polonya'nın güneyinde açılır. Keşifler tüm dünyaya hızla yayılır. 1861 yılında Baku petrol alanlarında ilk Rus rafinerisi inşa edilmiş olup, dünya petrolünün %90'ı bu alanlarda üretilmektedir. Fakat gelişme yavaştır. Çünkü petrolün hemen tek kullanım alanı, başta sokak lambalarında olmak üzere, aydınlatma amaçlı kerosen üretimidir. 20. yüzyılın başlarında, içten patlarlı motorun keşfi ve başta ulaşım olmak üzere tüm sektörlere hızla yayılmasıyla birlikte alıp başını gider.

Devam etmek üzere...

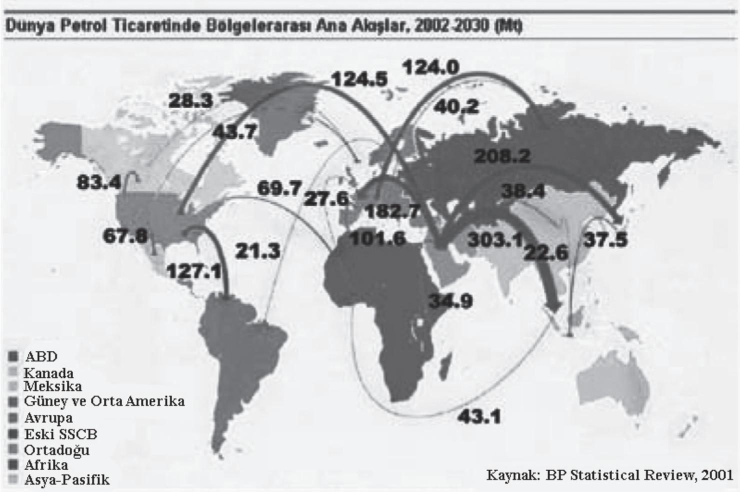
HUBBERT'İN ZİRVESİ'NDEN NASIL İNİLİR?

Ham petrol piyasalarda varille ölçülüyor. Varil bir zamanlar 40 ABD galonuydu. Ahşap fıçılarda depolanır ve tüketim noktasına ulaşana kadar bir kısmı buharlaşırdı. Amerikan Standart Oil şirketi, buharlaşma payını da hesaba katarak, piyasaya mavi boyalı 42 galonluk variller sürdü. Mavi renk, 42 galonluk içeriğin garantisini yansıtıyordu. Şirket dev bir tekel haline gelince 'mavi varil' standart haline geldi. Şirketin tekel karşıtı yasalara dayanılarak dağıtılmasından sonra da, aynı standardın kullanımına devam edildi. 42 galonluk 'mavi varil' (*blue barrel*) uluslararası piyasalarda halen 'bbl' şeklinde gösteriliyor: Yani 1 bbl = 42 x 1 ABD galonu (3,785 litre) =159 litre.

Dünya petrol tüketimi, 2005 yılı itibariyle günde 84 milyon varil düzeyinde. Tonu yaklaşık 7 varilden, yılda 4,38 milyar ton. Üretimin yarıdan fazlası dış ticarete konu. Dünya rezervlerinin üçte ikisi, Ortadoğu'da. İhracata konu olabilecek üretim fazlası esas olarak OPEC'in Ortadoğulu üyelerinin elinde. Körfez ülkeleri halen, dünya petrol ihracatının yarısını sağlıyor ve 2023 yılı civarında bu oranın, %75'e çıkması bekleniyor. Şekil 1'de Dünya petrol ticaretindeki bölgelerarası ana akışlar görülmekte.

Petrol sanayisinde ham petrol, kaynağına göre etiketlenip, yoğunluk, akışkanlık ve kükürt oranı gibi değişkenlerin değerine göre kalite açısından sınıflandırılıyor. Amerikan Petrol Enstitüsü'nün (API) belirlediği yoğunluk ayrımı 0,7 ila 1,0 kg/lt arasındaki değerlere karşılık gelmek üzere hafif, orta ve ağır şeklinde. İçerdiği kükürt oranına göre, rafinericiler tarafından ekşi veya tatlı olarak nitelendiriliyor. Örneğin 'ekşi' petrol daha yüksek oranda kükürt içeriğine sahip. Bu kirletici unsurun giderilmesi ek işlemler gerektirdiğinden, ayrıştırma maliyetini yükseltiyor. Bu çerçevedeki isimlendirmeye bir örnek, "orta yoğunluktaki Batı Teksas petrolü" anlamında 'Batı Teksas Orta'.

Dünya piyasalarındaki fiyatların belirlenmesinde, bazı petrollerin varili başvuru değeri olarak kullanılmakta. Örneğin 'Brent ham-petrolü', Kuzey Denizi'nin Doğu Shetland Alanı'ndaki Brent ve Ninian petrol sahalarından çıkartılıp satışı Shetland'daki Sullom Voe terminalinden yapılan 15 petrol tipini kapsıyor. Avrupa, Afrika



Dünya Petrol Ticaretinde Bölgelerarası Ana Akışlar, 2002-2030 (Mt)

Kaynak: BP Statistical Review, 2001

Şekil 1

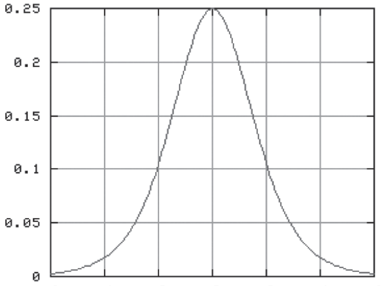
ve Ortadoğu'da üretilip Batıya giden petrolün fiyatı, bu 'başvuru petrolü'nün fiyatına göre belirlenmekte. "Brent artı 0,25 ABD dolar/varil" gibi...

Diğer başvuru petrolleri; Kuzey Amerika kullanımında 'Batı Teksas Orta', Asya-Pasifik alanına giden Ortadoğu petrolleri için 'Dubai', Uzakdoğu'nun hafif petrolleri için Tapis (Malezya) ve ağır petrolleri için Minas (Endonezya). OPEC ise fiyatını belirlerken bir 'başvuru sepeti' kullanıyor. 2005'te, daha önce kullandığı sepeti değiştirerek, üyelerinin ürettiği petrollerin özelliklerini yansıtmayı hedefleyen yeni bir 'OPEC Referans Sepeti' (*Opec Reference Basket, ORB*) oluşturdu. Bu sepette; Sahra Karışımı (Cezayir), Minas (Endonezya), İran Ağır, Basra Hafif, Kuveyt İhraç, Es Sider (Libya), Bonny Hafif (Nijerya), Katar Deniz, Arap Hafif (Suudi Arabistan), Murban (BAE) ve BCF 17 (Venezüella) petrolleri var. OPEC'in referansı, bunların ağırlıklı ortalama fiyatı.

Petrolün büyük bir kısmı borsalarda değil, 'tezgâh üzerinden' ve tipik bir 'belirleyici' (*marker*) 'ham petrol sınıfı'na başvurularak belirlenen fiyatlardan alınıp satılıyor. Fiyatlardan bahsedilirken, genellikle iki tip petrolden birinin 'nokta' (*spot*) alımlarında kullanılan fiyatlara atıfta bulunuluyor: Batı Teksas Hafif petrolünün Cushing, Oklohoma'da teslim edilmek kaydıyla New York Ticaret Borsası'nda (NYMEX) veya Brent petrolünün, Sullom Voe'da teslim edilmek üzere Uluslararası Borsa'da (ICE) el değiştirdiği fiyatlar. Örneğin Avrupa'da, Fulmar gibi özel bir petrolün fiyatının “Brent+0,25 ABD dolar/varil” olarak belirlenmesinde olduğu gibi.

Bir varil petrolün çıkartma maliyeti Suudi Arabistan’da 2 dolara kadar inebiliyor. Fakat satış fiyatını belirleyen, çıkartma maliyeti en düşük olan varil değil, en pahalı olanı. Bu varilin satılabilirliğiniyse genelde arz talep dengeleri belirtiyor. Fiyatlar salınımlı bir seyir izlemekle beraber, salınım dipleri son yıllarda artış eğiliminde. Bunun, Dünya petrol üretiminin ‘plato’ya ulaşmış olup, bundan sonra azalacak olmasından kaynaklandığı yönünde görüşler var. Görüş, Dünya petrol rezervlerinin sınırlı olduğu ve sonunda tükeneceği varsayımına dayalı. Savunucuları görüşe destek olarak, tek bir petrol kuyusundaki üretim düzeyinin zamana göre seyrini gösteriyor ve üretim için, elde edilen petrol kadar su harcanmaya başlandığında, kuyudaki üretimin zirveye ulaşıp, bir süre sonra hızla azaldığına işaret ediyor. Ayrı ayrı petrol sahaları ve Dünya toplam petrol üretimi için de benzeri bir durumun geçerli olduğu kanaatindeler. Petrolün ‘biyoloji kökenli olmayan’ (*abiyojenik*) oluşum kuramı; ki bunu kabul eden jeofizikçi yok denecek kadar az; doğru değilse veya böyle bir sürecin rezervlere katkı hızı sınırlı ise bu durumun kaçınılmaz olması gerekiyor.

Görüş, Shell şirketinde çalışan Amerikalı jeofizikçi M. K. Hubbert’in 1956 yılında yayınladığı bir çalışmaya dayanmakta. Hubbert, ABD’de yeni petrol sahaları keşfinin 1930’larda en yüksek düzeyine ulaştıktan sonra azalmaya başladığını fark etti. Yenilerinin devreye sokulamaması halinde, mevcut sahalardan yapılan üretimin zamanla, çan eğrisi şeklinde bir seyir izleyeceğini ve tek bir zirveden geçtikten sonra azalacağını düşündü. Elindeki verilerden hareketle bir çan eğrisi oluşturdu (bkz. Şekil 2). Yatay eksen, zamanı temsil etmekte. Dikey eksen ise, belli bir yıldaki üretimin, çıkartılması mümkün olan rezervlerin tümüne oranı. Dolayısıyla, eğrinin altındaki alan 1’e eşit. Eğrinin tek bir zirvesi var, “Hubbert’in Zirvesi”. Kurama da “Hubbert’in Zirve Kuramı” deniyor. Hubbert, bu çalışmasından hareketle, ABD’nin 48 eyaletindeki petrol üretiminin, artı eksi bir yıl hata payıyla, 1969 yılında zirveye ulaştıktan sonra 1970’lerde azalmaya başlayacağını öngördü ve bu öngörü doğru



Şekil 2

çıktı. Sonradan anlaşıldığına göre, ABD'nin üretimi 1971 yılında zirveye ulaşmış ve ardından, yeni sahalar bulunamadığından fazlalık üretim kapasitesi aşınmıştı. OPEC'in 1973 Ortadoğu Savaşı'ndan sonra uyguladığı ambargo bu sayede etkili oldu.

Hubbert bunun üzerine 1974 yılında tüm Dünya için yaptığı yeni bir çalışmayla, kanıtlanmış rezervlerin 900 milyar varil civarında olduğu ve mevcut eğilimlerin, yani yılda %2'lik tüketim artışının devamı halinde, küresel petrol üretiminin 1995 yılında zirveyi aşacağı sonucuna vardı. Bu öngörü gerçekleşmedi. Fakat bunun, 1979 İran Devrimi'nden sonra petrol fiyatlarında yer alan ikinci büyük sıçramanın Dünya ekonomisinde yol açtığı durgunluktan kaynaklanan bir gecikmeden ibaret olduğu sanılıyor. Çünkü, İskoçya'nın Kuzey Denizi sahası 1990'ların sonlarında zirveyi aştı. Kuveyt'in dev Burgan sahası, Kasım 2005'te keza öyle. Çin, en büyük iki petrol sahasındaki üretimin gerilemekte olduğunu kabul ediyor. Meksika'nın ulusal petrol şirketi PEMEX, Dünya'nın en büyük açık deniz petrol alanlarından birisi olan Cantarell sahasındaki üretimin, Mart 2006'da zirveyi aştığını ve bundan sonrası için yılda %13-14 oranında gerilemesinin beklendiğini bildirdi. Suudi Aramco şirketi Nisan 2006'da yaptığı açıklamayla, eski petrol sahalarının %8, tümünün de ortalama olarak %2 oranında üretim kaybına uğradığını kabul etti. Bu, Dünya'nın en büyük petrol sahası olan Gavar'ın üretimde inişi geçmiş olabileceği anlamına gelmekte. Öte yandan, petrol arama teknikleri hayli gelişmiş durumda. Henüz bulunamamış olan rezervler arasından, en büyüklerinin en önce keşfedilmeleri olasılığı daha yüksek. Halbuki, en büyük miktarda rezerv içeren yeni sahalar 1962 yılında keşfedildi. Büyük rezervlerin keşfedilme olasılığı giderek azalıyor. Nitekim, yeni bulgular küçük hacimli. Uluslararası Enerji Ajansı'nın '2004 Dünya Enerji Manzarası' raporu (*World Energy Outlook, IEA*), Dünya'nın en büyük petrol üreticisi 48 ülkenin 33'ünde üretimin gerilemekte olduğunu bildiriyor.

Karşıtları, kuramın varsayımlarının sağlıklı olmadığı görüşünde ve olası sıkıntıların teknolojinin gelişmesiyle aşılacağı kanaatindeler. Örneğin italyan enerji şirketi ENI'nın yöneticilerinden Leonardo Margueri, kuramın sadece 'alışıldık' (*konvansiyonel*) petrolü göz önünde bulundurduğunu belirtiyor. Halbuki, Kanada'nın Alberta eyaletindeki Athabasca katranlı kumul (*tar sands*) yataklarındaki çıkartılabilir rezervlerin, 2006 itibariyle 180 milyar varil olduğu tahmin edilmekte. Bu, Dünya'nın en büyük alışıldık petrol rezevlerine sahip ülkesi olan Suudi Arabistan'ın 260 milyar varillik bilinen rezervi yanında hatırı sayılır bir miktar. Yatakların işletilmesine başlandı ve 2006 yılında 1 milyar varili bulan üretimin, 2015 yılında 3,2 milyar varile ulaşması bekleniyor. Venezüella'nın Orinoco katranlı kumul sahası, Dünya'nın ikinci büyük 'ağır petrol' rezervlerini barındırmakta ve keza işletmeye açıldı. Öte yandan, mevcut rezervlerdeki petrolün çıkartılabilme oranı 1980'de %30 düzeyindeyken, çıkarma tekniklerindeki gelişmeler sayesinde bu oran, halen %35'e ulaşmış durumda. Teknoloji gelişmelerinin bu eğilimi sürdürmesi beklenmeli. Nitekim, biraz da bu sayede, kanıtlanmış petrol rezervlerinin yıllık üretim hacmine oranı, 1948'de 20 iken, 1972'de 35, 2003'te 40'a çıktı. Yani, eldeki rezervlerin yıllık tüketimi karşılama süresi giderek uzuyor. Ayrıca, bilinen rezervlerin, kuramın savunucuları tarafından varsayıldığı gibi, 1 trilyon varil civarında olmayıp, 2-3 trilyon varili bulması mümkün.

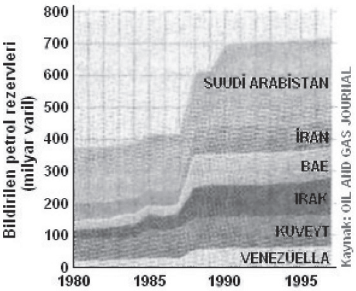
Kaldı ki, yapay petrol üretmenin, kanıtlanmış teknikleri var. Almanya'nın II. Dünya Savaşı sırasında geliştirdiği Fischer-Trops yöntemiyle, kömürün tonu başına yaklaşık 200 litre ham petrol elde edilebiliyor. Yöntem şimdiden, iki şirket tarafından ticarileştirilmiş durumda. Güney Afrika petrol şirketi Sasol bu yöntemi, yapay petrol ürünleri eldesinde kullanıyor ve halen ülkedeki dizel tüketiminin yarısını karşılamakta. Shell şirketi ise, Malezya'daki Bintulu tesisinde, girdi olarak kömür yerine doğalgaz kullanarak, düşük kükürt oranlı dizel üretiyor. Kömürden petrol eldesi için bir diğer yöntem, 1930'larda ABD'de geliştirilen 'Karrick süreci'. Yakınlarda geliştirilen, ısıl parçalamaya dayalı TDP (*thermal depolimerization*) yöntemi ise kuramsal olarak herhangi bir organik atığı ham petrole dönüştürme yeteneğine sahip. Ayrıca, en yoğun kullanıldığı ulaşım sektöründe petrolün yerini alabilecek etanol esaslı yakıtlar var. Bunlar güçlü iddialar. Kuramın savunucularının verdiği yanıtlar da en az o kadar...

Yapay petrol üretim yöntemleri pahalı, varil başına 35 ABD doları düzeyinde. Gerçi, 70 doları aşmış bulunan petrolün varil fiyatı, bunun iki misline yakın. Ancak maliyeti ölçmenin, paradan başka yöntemleri de var. Örneğin, herhangi bir enerji kaynağının içerdiği enerji miktarı ile, o kaynağın eldesi için harcanması gereken enerji miktarı arasındaki farka, 'net enerji kazancı' deniyor. Bu farkın harcanan enerji miktarına oranı da, 'net enerji kazancının enerji yatırımına oranı'. Gerçi bu ölçüt tartışmalı. Ama durum şöyle: Nasıl ki, bir tepeye tırmanış ile, öbür yamacından aşağıya iniş arasında bir zorluk farkı varsa; Hubbert'in zirvesine tırmanışı ile çan eğrisinin ikinci yarısından aşağıya iniş arasında da fark var. Zorluk ters yönde: Çan eğrisinde iniş daha zor. Nitekim 20. yüzyıl başlarındaki petrol keşiflerinde, 100 varil petrolün aranması, çıkartılması ve işlenmesi için 1 varil petrol harcanırken, bu oran 1920'lerde 50'ye indi. Halen 5 civarında. Suudi Arabistan'da ortalama 10. Kömürden etanol eldesi içinse kazanç negatif...

Petrol sanayisindeki uzmanların çoğu, 1997 yılı sonu itibariyle Dünyamızdan toplam olarak 800 milyar varil petrolün çekilmiş olduğu kanısında hemfikir. Bu rakamın o günden bu yana 1 trilyon varili bulmuş olması gerekiyor. Yeraltında 1 trilyon varil petrol daha varsa eğer, bu ikinci yarının çıkartılması çok daha zor ve pahalı olacak. Bu durum herhangi bir petrol sahasındaki 'çıkartılabilir rezerv'in ilk varilini çıkartmanın kolaylığıyla son varilini çıkartmanın zorluğu kıyaslandığında açık olsa gerek. Kaldı ki, kalan rezervlerin duyarlı tahmini zor...

Şirketler, işledikleri petrol sahalarındaki çıkartılabilir rezerv miktarı hakkında, sahayi işletirken inceledikçe daha iyi fikir sahibi oluyorlar. Fakat yapılan tahminler, hâlâ olasılıklara dayalı. Örneğin, belli bir sahadan çıkartılması mümkün görülen petrol miktarı, diyelim %90 olasılıkla 10 milyar varil. Buna rezervlerin P90 değeri deniyor. Ama diyelim %10 olasılıkla, çıkartılan miktarın 15 milyar varili bulması mümkün. Bu da P10 değeri. O halde rezerv bildiriminde, P50 değerinin kullanılması en mantıklı görüneni. Halbuki Batılı şirketler bunu yapamıyor. Çünkü rezervlerini şişkin göstererek hissedarlarını yanıltmalarını önlemek amacıyla, P90 değerlerini kullanmaları şart koşulmuş. Çoğu şirket bunu da yapmıyor. Keşfedilen yeni rezervleri, keşfedildikleri yılda bildirmek yerine, izleyen yıllar üzerine yaymayı tercih ediyor. Böylelikle borsalara, rezervlerinin düzenli bir şekilde artmakta olduğu izlenimini vererek, hisselerinin değerlerinde iniş çıkışların yaşanmamasını sağlamayı hedefliyorlar. Dolayısıyla bildirdikleri rezerv artışları, aslında geçmişte gerçekleşmiş olan eski keşiflere dayanmakta. Hatta bu çerçevedeki bildirimlerin dahi şişirildiği oluyor. Nitekim, ilgili şirketler hakkında artan sayıda davalar açıldı ve bazıları, bilançolarında yüksek kârlar görünmekle beraber, rezervlerindeki şişkinlik oranını törpülemek amacıyla birleşmek zorunda kaldılar. Şirketler cephesinde durum böyle. Ülkeler temelinde de farklı değil...

OPEC üyelerinin, grubun hedeflediği toplam ihracattaki payı, aralarındaki anlaşma gereği, sahip oldukları rezervlerin oranlarıyla sınırlı. Dolayısıyla, ihracat gelirini artırmaya çalışan üyeler, rezervlerini olduğundan fazla göstermek eğiliminde. Örneğin 1980'lerin sonlarında, OPEC'in 11 üyesinden 6'sı, Şekil 3'te gösterildiği üzere, rezervlerini %100'ü aşan oranlarla, toplam 287 milyar varil artırdı. Gerçi daha önceki rezerv rakamlarının, ulusallaştırma öncesinden kalma muhafazakâr ve olasılıkla P90 değerleri olduklarından dolayı artırılması gereği vardı. Ancak, yapılan artırımların P50'ye karşılık gelenden fazla olduğu sanılıyor.



Şekil 3
C. J. Campbell, J. H. Laherrere,
"The End of Cheap Oil",
Scientific American, Mart 1998.

OPEC'in piyasa düzenleyicisi, en büyük rezervlere sahip bulunan ve petrolden sağladığı gelire acil gereksinimi görece az olan Suudi Arabistan'dı. Ancak bu ülkenin de 1990'lardaki fiyat düşüklüğü nedeniyle kapasite genişlemesine yaptığı yatırımlar azaldı. Fazlalık üretim kapasitesi daraldığından fiyatları denetlemekte zorlanıyor. Çin ve Hindistan gibi hızlı büyüyen ülkeler, hızla artan enerji gereksinimlerini güvence altına almak amacıyla, son on yılda gerçekleştirdikleri ihracat fazlası sayesinde edindikleri hacimli döviz rezervleriyle, Dünya piyasalarına çıkmış, enerji şirketlerini yüksek bedellerle satın almanın peşinde. TPAO'nun da, uluslararası petrol sahalarında pay sahibi olma yönünde ciddi girişimleri var. Fakat toplumdaki enerji tartışmaları genelde, "biraz şundan olsun, ama ondan olmasın" gibisinden bir rahatlık içerisinde. Halbuki Hubbert'in kuramı doğruysa eğer, zirvesinden iniş çok zor olacak. Devam etmek üzere.

İyi ki doğalgaz var. Mı?...

DÜNYA'NIN GAZINI ALMAK

Doğalgaz hakkındaki bilinen en eski anlatım, MÖ 1000 civarından kalma. Parnassus Dağı'nda keçilerini otlatan bir çoban, yarığından alev fışkıran bir kayaya rastlamış. Çobanın keçileri kaçırıp kaçırmadığı bilinmiyor. Fakat yörenin Eski Grek sakinleri, yıldırım isabetiyle ateş almış olması gereken bir gaz sızıntısının beslediği bu 'yanar kaynak'ın ilahi kökenli olduğuna inanıp, etrafında bir tapınak yaptırmış. Tapınak 'Delfi Mabedi' olarak biliniyor. Mabedin bekçiliğini yapan rahibeler de kehanet gücünü sönmeyen ateşten aldıklarına inanılan "Delfi'nin Kahinleri..."

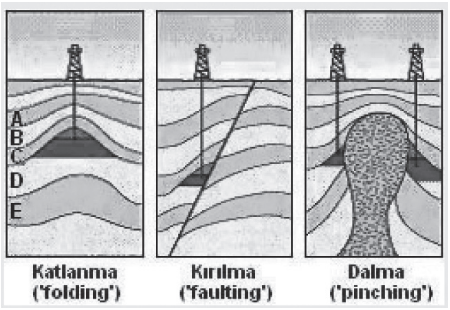
Doğalgazın ilk yararlı kullanımı, bilindiği kadarıyla MÖ 5. yüzyılda. Çin'de kamışların ucuna takılan aşındırıcı parçalarla açılan petrol kuyularından çıkan doğalgaz, yine kamıştan oluşturulan boru hatlarıyla görece yakın mesafelere taşınıp, deniz suyunun buharlaştırılmasıyla tuz ve saf su eldesinde kullanılmış.

Ancak doğalgazı yakalayıp taşımak zor olduğundan kullanımı yaygınlaşamadı. Bundan sonra gazın 18. yüzyıl İngilteresinde deniz feneri ve sokak lambalarında kullanıldığı görülüyor. Fakat bu, kömürün oksijensiz ısıtılmasıyla elde edilen, bizim havagazı da dediğimiz gazdı. 1885 yılında Robert Bunsen'in, kendi adıyla anılan ve gazın havayla uygun oranda karışıp temiz mavi bir alevle yanmasını sağlayan ocak başlığını keşfiyle birlikte, gaz konutlara da girdi. Büyük kentlerde havagazı üretim tesisleri kurulmaya başlandı. Halbuki petrolle birlikte çıkan doğalgaz taşınamadığından boşuna yakılıyor veya atmosfere salınıyordu.

II. Dünya Savaşı'ndan sonra yaşanan uzun süreli küresel ekonomik büyüme enerji gereksinimini artırırken, geliştirilen güçlü çelik malzemeler, metal bükme ve kaynak tekniklerindeki ilerlemeler, boru üretimini kolaylaştırdı. 1974 Petrol Ambargosu'ndan sonra, petrolün daha önce 2 dolar olan varil fiyatı, dört misline katlanarak 8 dolara fırladı. Artan enerji fiyatları, doğalgaza yönelişe hız kazandırmıştı. Nitekim, 1970'lerde Suudi Arabistan'da bir doğalgaz altyapısının oluştuğu ve petrol kuyularından çıkan doğalgazın toplanarak, deniz suyunun arıtılmasında kullanıldığı görülüyor. 1980 yılında ise enerji fiyatlarının tarihindeki en büyük mutlak değer artışını beraberinde getiren II. Petrol Şoku yaşandı. Petrolün varil fiyatı 8 dolardan 20 dolara çıkmıştı. Doğalgaz arama ve boru hattı projelerinde patlama gözlendi.

Yerkabuğunda bulunan doğalgazın çok büyük bir kısmı, petrole benzer şekilde oluşmuş. Tek hücreli deniz hayvanlarıyla yosunların (algler) kalıntıları, deniz dibine çöküp çamurla karıştıktan ve oksijensiz ortamda çürüyerek bozunduktan sonra, üstlerinde biriken kalın tortul katmanlarının altında, uzun süreli basınç ve ısı etkilerine maruz kalıp, 'yapısal dönüşüm'e (metamorfoz) uğramış. Derinlikle birlikte artan sıcaklık, petrolü oluşturan hidrokarbonların daha küçük moleküllere parçalanmasına ve kısmen ya da tümüyle doğalgaza dönüşmesine yol açmış. Hidrokarbonlar zamanla, içinde oluştukları 'kaynak kayaç'tan sızarak, hafiflikleri nedeniyle yükselmiş ve civarda varsa eğer, kireçtaşı veya kumtaşı gibi gözenekli bir yapıya sahip bir 'hazne kayaç'a göç etmiş. Bu katmandaki dikey geçitlerden de tırmanıp, mermer veya granit gibi geçirgen olmayan bir 'örtü kayaç' katmanına rastladıklarında, sıkışıp kalmışlar. Şekil 1'de, kırmızı ve mavi renklerle gösterilen petrol ve doğalgaz birikintilerinin sıkışma biçimleri görülüyor. Birincisinde, örtü kayaç katmanının zıt yönlerden sıkışması sonucunda katlanarak yukarı doğru bükülmesiyle oluşan (*antiklinal*) bombe örneği var. İkincisindeki birikinti, örtü kayacın kırılmasıyla sıkışmış. Üçüncüsünde ise geçirgen olmayan bir kaya kütlesi, ergimiş haldeyken hazne kayaca daldıktan sonra donmuş.

Doğalgaz aramalarına, petrolünkinde olduğu gibi, yüzey jeolojisinin incelenmesiyle başlanıyor. Yerçekimi sabiti (gravimetre) ve manyetik alan (manyetometre) ölçümleri, alt katmanların fiziksel özellikleri hakkında ipuçları veriyor. Ama en etkin arama aracı, yerkabuğuna zerkedilen ses dalgalarının geri dönen yansımalarının kayıtlarından oluşan sismograflar. Sesin değişik kayaç türlerindeki seyahat hızları bilindiğinden, farklı katmanların buluşma yüzeylerinden yansıyan dalgaların gidiş dönüş sürelerinden hareketle; katmanların aşağıya doğru yoğunluk sıralamasını, türlerini ve kalınlıklarını hesaplamak mümkün. Eskiden ses dalgaları üretmek için patlayıcılar kullanılıyordu. Bu yöntem çevresel sakıncaları

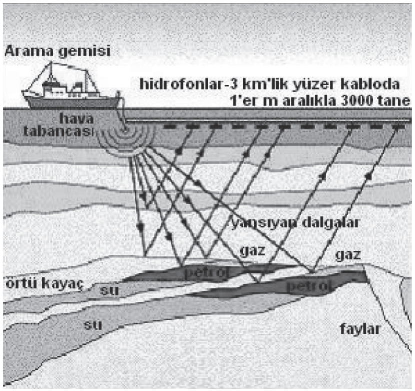


Katlanma ('folding') Kırılma ('faulting') Dalma ('pinching')

Şekil 1

fark edildiğinden terk edildi. Şimdi artık karada sırf bu amaç için tasarımlanmış kamyonlar kullanılmakta. Ses dalgaları, kamyonun orta kısmından çıkan bir pistonun darbeleriyle üretiliyor. Sismograflarla donanımlı diğer araçlar da verileri topluyor. Açık deniz aramalarındaysa, su altına basınçlı hava atımları püskürten tabancaların yol açtığı şok dalgalarının deniz dibindeki katmanlardan yansımaları, birkaç kilometre uzunluğundaki yüzer kabloya birer metre aralıkla dizilen binlerce su altı kulaklığı (*hidrofon*) tarafından toplanıp kaydedilmekte. Bu veriler ‘bilgisayar destekli arama’ (*Computer Aided Exploration, CAEX*) tekniğiyle işlenerek, yeraltının iki veya üç boyutlu görüntüleri oluşturuluyor. Üç boyutlu görüntü üretimi pahalı, km^2 başına 9 bin dolar kadar. Yerbilimciler bu görüntüleri inceleyip, kaynakların nerelerde gizlenmiş olabileceğini kestirmeye çalışıyor. Fakat tahminlerin isabet oranı %10 düzeyinde. Bir bölgede doğalgaz bulunup bulunmadığı, kuyu açılıncaya kadar kesinlik kazanamıyor. Dolayısıyla, bir sonraki aşama ‘deneme kuyusu’ açmak. Arama kuyusu açma işi de dart oyununa benziyor. İsabet kaydetme olasılığı ortalama %27.

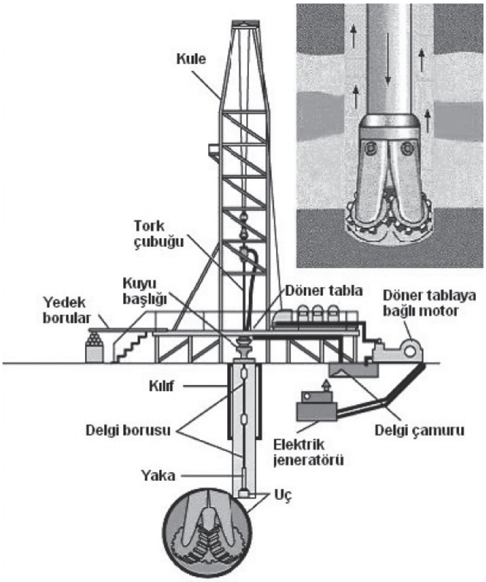
Kuyunun açılacağı noktanın belirlenmesinden sonra, ulaşım yollarının açılması ve civardaki alanın, çalışmaya engel olabilecek bitki unsurlarından temizlenip kısmen düzeltilmesi gerekiyor. Güç kaynağı olarak, varsa yakından elektrik hattı çekilmesi, aksi halde bir dizel motor-jeneratörünün getirilmesi lazım. İşlem sırasında bol miktarda su da kullanılmakta. Dolayısıyla tesisat suyuna ulaşılamayıp yüzeyde yeterince hacimli bir doğal su kaynağının da bulunamaması halinde, önce bir su kuyusu deliniyor. Atıklar için bir çukurun açılması ve dibinin yeraltı sularına olası sızıntıları önleyecek şekilde plastik malzemeyle kaplanması gereği var. Nihayet, delme noktasını merkez alan dikdörtgen şeklinde bir çukur daha açılıyor. Kule ‘bodrum’ denilen bu çukurun üzerine inşa edilip, delme işlemi burada yapılacak.



Şekil 2

Kuyu için önce, örneğin bir kamyonun arkasına takılı halde çalışan bir burguyla, 40-50 cm çapında ve 6-15 m derinliğinde bir ‘kılavuz delik’ açılıyor. Kuyu ağzının daha sonra çökmemesi için, içi metal veya beton bir boruyla kılıflanıp, kılıfın dışı betonlanıyor. Kılavuz deliğin işlevi, kuyunun daha sonraki kısımlarının ve içine indirilecek olan donanımın kararlılığını sağlayıp, asıl delme işleminde kullanılan aşındırıcı kafayı koruyan 'delgi çamuru'nun dipten yukarı doğru dolaşımını kolaylaştırmak. Kule ve delgi donanımı bundan sonra kuruluyor. Kulenin zemininde, motor-jeneratöre bağlı bir döner tabla ve zeminin üst kısmında bir vinç düzeneğiyle, rahat çalışma hacmi sağlayacak bir yükseklik var.

Döner tablanın ortasından, kare ya da altıgen yatay kesitli bir tork çubuğu geçiriliyor. Üst ucu şekilde görülen vinç halatına bağlı. Alt ucu ise şimdilik serbest. Çubuk gerektiğinde yanlamasına sıkıştırılıp tablaya sabitlenebiliyor ve bu durumdayken motor-jeneratör çalıştırıldığında, tablayla birlikte dönmek zorunda. Çubuğu gerektiğinde gevşetip, vinç askısıyla yukarı kaldırmak veya aşağıya indirmek de mümkün. Delgi borusu bu çubuğun alt ucuna takılacak ve tabla döndükçe boruyu döndürecek. Borunun diğer ucunda delgi kafası var. Kafa, şekilde görüldüğü gibi parçalı ve parçalar, tungsten-karbür çeliğinden yapılma veya elmas olabilir. Delme işlemine başlamadan önce, 10 m uzunluğundaki bir delgi borusunun alt ucuna 'yaka' veya 'gömlek' denilen kalın etli bir boru geçirildikten sonra uca delgi kafası takılıyor. Yakanın işlevi, kafanın üzerinde ağırlık oluşturmak. Borunun üst ucu daha sonra 'kuyu başlığı' denilen silindir simetrik bir vananın ortasından geçirilip, enlemesine sıkıştırılıyor ve başlık kuyunun ağzına oturtulup sabitlendiğinde, delgi borusuyla kafası kuyunun içine sarkmış oluyor. Başlığın görevi, kuyu içeriğinin dışarı fışkırmasını önlemek. Delme sırasında karşılaşılabilecek yüksek basınçlara dayanıklı olması ve gerektiğinde emniyet sübapı gibi davranıp, altındaki basıncı rahatlatabilmesi gerekmekte. Aksi halde delgi kafasının yolda rastladığı, yüksek basınç altında sıkışmış haldeki gaz ve su birikintilerinin kuyunun içine girip çamura karışması, hat-



Şekil 3

ta taşmalara yol açması mümkün. Kuyunun özellikle hazne kayacın yüksek basıncına ulaşıldığında patlaması olasılığı bile var. Bazı filmlerde sevinç çığlıklarıyla karşılandığı görülen ve fakat aslında kulenin sağlığı açısından yer alması hiç istenmeyen bir şekilde...

Delgi borusunun üst ucu tork çubuğuna takılarak, ikisi birlikte olabildiğince aşağıya indiriliyor. Delgi kafası kuyunun dibine değiyorsa, tork çubuğu sıkıştırılıp motor jeneratör çalıştırılarak, delme işlemine başlanıyor. Değiniyorsa, tork çubuğu gevşetilip yükseltiliyor ve delgi borusu çubuktan ayrıldıktan sonra, serbest kalan üst ucuna on metrelik bir boru kesiti daha takılıp, boyu uzatılıyor. Ardından, tork çubuğu tekrar indirilip, delgi borusuyla birleştiriliyor ve ikisi birlikte, tekrar kuyuya indiriliyor. Bu işlemin, delgi borusunun boyunun uzatılması gereken durumlarda tekrarlanması lazım. Aralarda 10'ar metrelik delme işlemlerinin gerçekleştirilmesi mümkün. Delme sırasında döner tabla tork çubuğunu, çubuk da delgi borusunu döndürdükçe, delgi kafası karşılaştığı katmanı aşındırıyor. Bu sırada, delgi borusunun içinden aşağıya doğru 'delgi çamuru' pompalanmakta. Çamur delgi kafasının parçaları arasından çıkıp, delgi borusunun dış yüzeyiyle kuyunun iç çeperi arasındaki boşluğu doldurarak, yukarıya doğru tırmanıyor. Borunun içinden pompalandığı sürece, çamurun akışı, Şekil 3'ün sağ tarafında gösterilen biçimde. İşlevi; delgi kafasını temizleyip yağlayarak çalışmasını kolaylaştırıp aşınmasını yavaşlatmanın yanında, onu bir yandan da soğutarak, aşırı ısınma sonucunda malzemesinin niteliklerinin değişmesini önleyip ömrünü uzatmak. Çamur aynı zamanda, delgi kafasının öğüttüğü kaya parçalarını yukarı taşıyor. Yukarıda bir süzgeçten geçtikten sonra 'çamur çukuru'na ulaşıyor ve buradan kuyuya geri pompalanıyor. Bir işlevi daha var, o da önemli. Kuyuyu doldurmuş olması nedeniyle, delgi kafası üzerinde 'durağan sıvı basıncı' (hidrostatik basınç) oluşturmakta. Bu basınç, yakanın ağırlığıyla birlikte, kafanın karşılaştığı geriye teptirici basınçları dengelediği gibi, kafanın ilerlemesine de yardımcı oluyor. Çünkü bunun dışında, örneğin delme borusuna, kafayı aşağıya doğru ittiren herhangi bir kuvvet uygulamak mümkün değil. Uygulansaydı eğer, uzunluğu yüzlerce metreyi aşacak olan delgi borusu, böyle bir sıkıştırma kuvvetinin doğrultusunun hafifçe dahi eksen dışına kaymasının yol açacağı momentin etkisiyle, enlemesine bükülerek yamulurdu. Delgi borusunun bu açıdan yegâne işlevi, tork çubuğundan aldığı torku delgi kafasına aktarmaktan ibaret. Dolayısıyla, kafa üzerinde basınç sağlama işlevi, gömlekle çamura ait ve çamurun bu işlev açısından, kafanın karşılaştığı basınç düzeyindeki değişmelere bağlı olarak, yoğunluğunun zaman zaman değiştirilmesi gerekmekte. Bu, yukarıdaki çamur çukurunda yapılıyor. Çamur esas olarak sulandırılmış kilden (bentonit) oluşmakta. Fakat içine, akışkanlığını ayarlamak için organik maddeler, topaklanmayı önleyici ‘anyonik polielektrolit’ler veya tanik asit türevleri katılıyor. Yoğunluğunu artırmak için hematit ve baryum sülfat gibi ağır, azaltmak için de kalsiyum karbonat gibi görece hafif katkı maddeleri eklenmekte. Çamurun kimyasından sorumlu görevliye ‘çamur mühendisi’ diye takılmak âdetten. Genellikle çamur ve katkı malzemelerini satan şirketin elemanı. Aslında bir ‘akışkan bilimci’ ve ‘reoloji’ mühendisi. Kuyudan kuyuya koşarak, her kuyunun o aşamadaki gereksinimlerini karşılayacak karışımı yakalamaya çalışıyor.

Delgi kafasının etkin yarıçapı, kuyu derinleştikçe kademeli olarak küçültülecek. Dolayısıyla kuyunun dikey kesiti teleskop şeklinde. Kademelerin sayısı genelde üç ve iç yüzeylerinin metal ya da beton bir boruyla kılıflanıp, kılıfın dışının betonlanması gerekiyor. Bunun amacı, oluşabilecek basınç farklılıkları karşısında kuyunun yapısal bütünlüğünün korunmasını sağlamanın yanında; kuyunun işletilmesi sırasında yükselen hidrokarbonların çeperden sızarak veya daha derinlerdeki tuzlu suların yükselerek, tatlı yeraltı sularına karışmasını önlemek. Kuyu ağzından hemen sonra gelen ve ağzın içine oturan ilk kısım, 100-600 m derinliğindeki yüzeysel kılıf. Ardından, genellikle en uzun bölümü oluşturan orta kademe kılıfı gelmekte. Son kademe ise hazne kayacın içinde olacak. Toplam derinlik 12 km’yi bulabiliyor.

Kuyunun derinliği ilk kademe için hedeflenen rakama ulaştığında, delgi borusu yukarı çekilip, parça parça sökülüyor. Kuyu başlığı yerinden çıkartılıp veya girişi genişletilip, bu sefer içine; yukarıdan parçalar eklendikçe boyu uzayan, ek yerleri eksenel düzgünlüğü sağlamak amacıyla dıştan bileziklenen ve boyu uzadıkça kuyuya indirilen bir kılıf borusu geçiriliyor. Borunun dış yarıçapı, kuyu ağızının içine tam oturacak büyüklükte. Boyu ise alt ucu kuyunun dibine değdiğinde, üst kısmı kuyu ağzıyla kısmen çakışacak uzunlukta. Böylelikle kuyu, çeperinden içeriye olası sızmalara karşı yalıtılmış oluyor. Ancak kuyunun işletilmesi sırasında kılıfın maruz kalacağı sarsıntılar karşısında yapısal kararlılılığını da koruyabilmesi için dışının betonlanması lazım. Bunu kılıfın dışına, yukarıdan aşağıya doğru harç dökerek başarmak mümkün değil. Çözüm şu: Çelik bir halatın ucuna, silindir şeklinde ve kılıfın içine tam oturan yarıçapta bir tıkaç takılıp aşağı sarkıtılıyor. Tıkaç dibe değdiğinde, üst yüzeyiyle kılıfın alt ucu arasında bir miktar boşluğun kalması gerekmekte. Ardından kuyu başlığı kapatılıyor ve kılıfın içinden aşağıya, uygun miktarda harç pompalanıyor. Halatın üst ucundan bir tıkaç daha geçirilip aşağı kaydırıldığında, dipte biriken harç, iki tıkacın arasında kalmış oluyor. Sıra delgi çamuru pompalamakta. Çamurun basıncıyla sıkışan harç, kılıfın dış yüzeyinden yukarıya doğru yükselerek, kuyu çeperiyle aradaki boşluğu dolduruyor. Harç tutmaya yüz tuttuğunda, kuyu başlığı açılıp, halatla birlikte tıkaçlar da çekilip çıkartılıyor. Kılıfın içi temiz. Birinci kademe bitmiş halde. İkinci kademe daha küçük bir delgi kafasıyla, benzer şekilde...

Delme işlemi sırasında delgi çamurunun yukarıya taşıdığı kaya parçaları, bir jeofizikçi tarafından mikroskop altında incelenip, fiziksel özellikleri ve hidrokarbon içeriği kayda geçiriliyor. 'Çamurun kaydını tutmak' (*mudlogging*) olarak nitelendirilen bu işlem, hazne kayaca yaklaşıldıkça sıklaştırılmak durumunda. Hazne kayaç delinip de, bu son kademe kılıflandığında, delme işlemi bitiyor. 'Kuyunun tamamlanması' için hidrokarbonların kuyuya sızmasını kolaylaştırmak üzere, son kademe kılıfının hazne kayaçtaki kısmında deliklerin açılması lazım. Bu eskiden, kuyuya küçük bir tabanca sarkıtılıp ateşlenerek yapılırdı. Şimdi ise elektrikle ateşlenen minik patlayıcılar kullanılmakta. Ardından kuyuya asit çözeltisi zerk ediliyor ve bu minik deliklerden geçip, hazne kayacın içindeki çatlakları genişletmesi sağlanıyor. Son olarak kuyu başlığına, çeşitli vanalar ve basınç göstergelerinden oluşan bir 'noel ağacı' takılıyor.

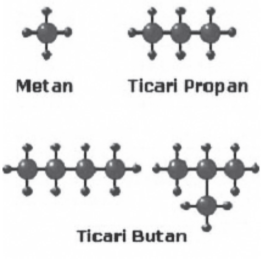
Kuyu bitti... Doğalgaz yola çıkmak üzere...

DOĞALGAZ NE KADAR DOĞAL?

Tüketime sunulan haliyle doğalgaz, pek de doğal sayılmaz. Çünkü, petrol veya doğalgaz kuyularından çıkan ‘ham doğalgaz’ın işlenmesiyle elde edilir. ‘Metan’ olarak adlandırılması, belki daha doğru olurdu. Çünkü hemen tümüyle metan ile biraz da ham gazın işlenmesi sırasında uzaklaştırılamayan diğer bazı gazlardan oluşur. Yoğunluğu, 0°C sıcaklık ve 1 atmosfer basınç altında, bileşimine bağlı olarak 0,7 ila 0,8 kg/m^3 arasında değişmekte.

Kuyulardan çıkan ham doğalgaz ise büyük oranda metandan oluşmakla birlikte etan, propan ve bütan gibi daha ağır hidrokarbonların yanında; su buharı, hidrojen sülfit, karbondioksit ve bazı asal gazlar gibi safsızlıklar da içerir. Bileşimi ve bazı bileşenlerinin molekül yapısı tabloda görülüyor. Ağır hidrokarbonlar görece kolay yoğuştuklarından, ‘Doğalgaz Sıvıları’ (DGS) olarak da anılırlar ve bunları içeren ham doğalgazın ‘ıslak’ olduğu söylenir. Halbuki iletim kolaylığı ve güvenlik açısından, tüketime sunulacak doğalgazın hemen tümüyle metandan oluşması istenir. Çünkü yoğuşmalar pompalama işlemini güçleştirdiği gibi; örneğin propan ve bütan gaz halindeyken havadan ağır olduklarından, bir sızıntı halinde yerde birikerek güvenlik riski doğururlar. Halbuki metanın havadan hafif olması, yükselerek dağılmasıyla sonuçlanır ve havayla, patlama sınırına yakın tehlikeli oranlarda oksijen içeren karışımlar oluşturmasını zorlaştırır.

Kuyu çıkışındaki doğalgaz bileşimi			Kaynama noktası, ^{0}C
Metan	CH_4	%70-90	-161,6
Etan	C_2H_6	%0-20	-103,7
Propan	C_3H_8		-42,09
Butan	C_4H_{10}		-0,5
Karbondioksit	CO_2	%0-8	-78 (süblimleşme
Oksijen	O_2	%0-0,2	-182,95
Nitrojen	N_2	%0-5	-195,79
Hidrojen sülfit	H_2S	%0-5	-60,28
Asal gazlar	A, He, Ne, Xe	Eser mik.	(-185,85), (-268,93), (-246,08), (-108,12)



Öte yandan, az miktarda su buharı dahi metanla beraberken sıcaklık düşünce, su molekülleri metan moleküllerini kafesleyerek 'metan hidrat'lar oluşturur. Bu moleküller, katı veya yarı katı halde olup, buz kristaline benzerler ve birikmeleri halinde, pompalama sistemindeki akış profilini olumsuz etkileyerek, donanımın sağlıklı çalışmasını engellerler. Ayrıca hidrojen sülfit su buharıyla birleştiğinde, sülfürik asit oluşturur ki bu, çevresel açıdan sağlıksız, güçlü bir aşındırıcı paslandırıcıdır. Metreküpü başına 5,9 mg'dan fazla H_2S içeren gazın 'ekşi' olduğu söylenir. Dolayısıyla, kuyudan çıkan ham doğalgazın, metan dışı unsurlarından olabildiğince arındırılması, yani 'kuru' ve 'tatlı' hale konması gerekir. O halde kuyudan sonraki ilk durağı bir işleme tesisidir...

Ham doğalgaz üreten üç tip kuyu var. Aslında petrol çıkartılan, fakat bu arada petrolün içinde çözünmüş olarak gaz da çıkaran kuyulara 'bağıl gaz kuyusu' deniyor. Yalnızca doğalgaz üreten kuyulara gelince; bazılarında ağır hidrokarbonların oranı, gaz fazını oluşturan metanın doyma oranından yüksek. Dolayısıyla, bu ürünlerin bir kısmı yoğuşmuş halde çıkıyor. Bunlar, 'ıslak kuyu'lar. Yüzeye ulaşan ürünlerin hemen tümünün gaz halinde olduğu kuyulara da, basitçe 'doğalgaz' kuyusu denmekte.

Gazın işlenmesine aslında kuyunun ağzında başlanır ve gazla birlikte çıkan sıvı fazdaki su, gazdan burada ayrıştırılır. Ayrıca kuyuların yanında, ürünle birlikte gelen kum ve benzeri katı parçacıkları ayrıştıran süzgeçler, gazın sıcaklığını metan hidratların oluşumuna imkân vermeyecek yükseklikte tutan ısıtıcılar var. Bazı işlemler kuyunun tipine bağlı. Örneğin bağıl gaz kuyularından çıkan ham gaz petrolden, bazen kuyu başındayken ayrıştırılır ve kısmen civardaki 'enjeksiyon kuyuları'na yönlendirilip, burada yeraltına pompalanarak, komşu üretim kuyularındaki petrolün çıkış hızının yükseltilmesine çalışılır. Gazın fazlası işleme tesisine pompalanır.

Tipik bir gaz işleme tesisi 1 ila 2 cm yarıçapındaki görece ince 'toplama boruları' aracılığıyla 100 kadar kuyuya bağlıdır. İlk işlem, gaz ve sıvı fazları birbirinden ayırmaktır. Bağıl gaz yeraltındaki yüksek basınç nedeniyle petrolde çözünmüş halde olduğundan, düşük basıncı gördüğünde, petrolün içinde kendiliğinden yükselir. Dolayısıyla, petrolden ayrıştırılması için, bir tanktan oluşan basit bir ayrıştırıcıdan geçirilmesi yeterlidir. Islak kuyulardan gelen gazın sıvılardan ayrıştırılması için de benzeri bir durum söz konusu. Tankın altından, sıvı haldeki petrol veya yoğuşmuş ağır hidrokarbonlar, üstünden de gaz alınır. Ancak gazın yeraltındaki basıncının yüksek olması halinde, özellikle hafif petrol üreten bağıl gaz kuyularında veya ıslak doğalgaz kuyularında, sıvı fazdaki çözünmüş gaz oranı yüksektir. Bu durumda, sıvı fazdaki gazın ayrışmasına yardımcı olmak gerekir. Bunun için girdiyi oluşturan gaz karışımını, basıncını aniden düşürmek suretiyle soğutan 'düşük sıcaklık ayrıştırıcıları' kullanılır. Basıncı düşünce çözünürlüğü azaldığından, sıvı fazdaki gaz ayrışmak zorunda kalır. Gaz fazındaki ağır hidrokarbonlar da bu sırada, sıcaklık düşüşü nedeniyle kısmen yoğuşarak sıvı faza geçerler. Bir taşla iki kuş...

İşleme sürecinin bundan sonraki kısmı, farklı tip kuyular için aynı. Ham gazdaki su buharının, ağır hidrokarbonların ve hidrojen sülfitin ayrıştırılması lazım. Su buharını uzaklaştırmak için, iki ana yöntem var: sıvı haldeki bir kurutucu maddenin 'bünyesine emdirmek' (absorpsiyon) veya katı bir kurutucunun yüzeyinde tutmak (adsorpsiyon). 'Bünyeye emdirme'ye bir örnek, glikolle 'susuzlaştırma' (dehidrasyon). Bu yöntemde ıslak gaz bir 'kule'nin üstünden verilip, bir glikol çözeltisinin üzerinden geçiriliyor. Kullanılan çözelti, dietilen glikol (DEG) veya trietilen glikol (TEG). Suya karşı kimyasal çekici olan glikol zerrecikleri, temas yüzeyindeki buhar moleküllerini yakalayıp, doydukça ağırlaşarak çözeltinin dibine çökerken, neminden büyük oranda arındırılmış olan gaz, kulenin altından yoluna devam ediyor. Glikol çözeltisini, neme doymasına fırsat vermeksizin tekrar tekrar kullanabilmek lazım. Bunun için, çözeltinin alt tarafındaki neme doymuş kısım peyderpey çekilip alınıyor ve glikolu çözücüden ayrıştırıldıktan sonra, bir kazana yönlendirilip, 100°C'nin üstüne kadar ısıtılıyor. Suyun kaynama noktası 100°C, halbuki dietilen veya trietilen glikolünki 244-245°C olduğundan, bünyesindeki su buharlaşırken kendisi sıvı halde kalan glikol kurutulmuş oluyor ve tekrar çözelti haline getirilip kuleye geri gönderiliyor. Son zamanlarda bu sürecin, kazan öncesine bir işlem daha eklendi. Glikol ham gazdan, su buharıyla birlikte bir miktar metan da çekmekte. Isıtıcıda açığa çıkan bu metan eskiden, kazanın bacasından atmosfere salınırdı. Halbuki metan, hava kirliliğine yol açan bir sera gazı. Dolayısıyla, glikolu kazana göndermeden önce, içerdiği metanın veya diğer ağır hidrokarbonların önemli bir kısmını, ani basınç düşüşüyle genleştirip soğutarak glikolden ayrıştırıp yakalamak mümkün. 'Flaş tankı ayrıştırıcısı' denilen bu düzenekle, glikolü kazana göndermeden önce, içerdiği metanın %90 ila 99'u geri kazanılabiliyor.

Ham gazın nemini almanın ikinci yöntemi, katı kurutuculara dayalı. Yüzeyden emilişi başaran katı kurutucu olarak, 'aktif alümina' veya 'daneli silika jel' malzemesi kullanılmakta. Islak gaz, bu malzemeyle dolu bir kulenin üstünden girip altından çıkıyor ve içerdiği nem, yol boyunca rastladığı kurutucu parçacıkların yüzeylerinde yakalanıyor. Bu sistemde katı kurutucunun, doyuma yaklaşması halinde neminin alınması görece kolay. Kuleye giden ham gaz akışını kesip, altından yeterince yüksek sıcaklığa kadar ısıtılmış hava vermek, bunun için yeterli. Ancak gaz işleme sürecinin bu sırada devam edebilmesi için, kule sayısının iki veya daha fazla olması lazım. Katı kurutuculu nem alma sistemleri, glikol sistemlerine göre daha etkin. Özellikle yüksek basınç altındaki büyük debili gaz akışlarında kullanılmaya uygunlar. Bu yüzden, doğalgaz iletim hatları üzerindeki kurutucu 'ara istasyonlarında da kullanılıyorlar.

Ham gazdaki ağır hidrokarbonların alınması için keza iki yöntem var: Nem emici bir yağın bünyesine emdirmek veya 'kriyojenik genleşme' süreci. Birinci yöntemde gaz, buharın sıyrılması işleminde olduğu gibi; bir kuleye üstünden verilip, emici bir sıvının üzerinden geçirildikten sonra alttan alınıyor. Yalnız, emici sıvı olarak, glikol çözeltisi yerine bir yağ kullanılmakta. Nasıl ki glikol suya karşı çekici ise, bu yağ da doğalgaz sıvılarına karşı öyle. Propan, bütan, pentan ve diğer ağır hidrokarbonların önemli bir kısmını geçiş sırasında emiyor ve bütanların %75'ini, pentan ve daha ağır hidrokarbonların %85 ila %90'ını yakalayabiliyor. Temel seyri bu olan sürecin etkinliğini biraz daha artırmak da mümkün. 'Soğutulmuş yağa emdirme' tercihinde, yavan yağ önceden bir miktar soğutuluyor. Bu yapıldığında, ham gazdaki etanın %40 kadarı, propanın %90'dan fazlası, daha ağır doğalgaz sıvılarının ise %100'e yakını emilebilmekte. Tabii, emdikçe kalınlaşan yağın doyuma ulaşmaması için, peyderpey çekilip bir kazanda ısıtılması ve emdiği ağır hidrokarbonların geri kazanılmasından sonra kuleye geri döndürülmesi lazım. Kazandaki ısıtma süreci, aslında bir 'kısmi damıtma'. Söz konusu hidrokarbonlar bu işlem sırasında, ağırlıklarına paralel olarak artan sıcaklıklarda buharlaşarak yağdan ayrılıyor. Ayrı ayrı yoğuşturulmaları sonucunda elde edilen sıvılar, atık değil ürün...

Örneğin etan ya da 'etilen', başta plastikler olmak üzere, diğer bazı kimyasalların üretiminde girdi olarak kullanılmakta. Moleküllerinin birbirine bağlanarak 'polimerleştirilmesi' ile dünyada en yaygın olarak tüketilen plastik türü olan 'polietilen' üretiliyor. Klor-laştırılmasıyla elde edilen etilendiklorid, başka bir plastik türünün, 'polivinil klorid'in öncülü. Etanın benzenle birleştirilmesi, diğer önemli bir plastik çeşidi olan polistiren'in üretiminde kullanılan 'etilenbenzen'i vermekte. Oksitleştirilmesiyle etilenoksit, etanol ve polivinil asetat elde ediliyor. Propan ve bütan ise molekül başına daha fazla sayıda karbon içerdiklerinden, mol başına metandan daha yüksek enerji içeriğine sahipler. 'Sıvılaştırılmış petrol gazı' (LPG) olarak bildiğimiz yakıt, yaklaşık yarı yarıya bir oranla, propan ve bütanın ticari formlarından oluşmakta. Bu aşamada, doğalgaz ile LPG arasındaki farkı biraz açıklamakta yarar olabilir…

LPG petrol kuyularından çıkartılabildiği gibi, ham petrolün ayrıştırma sürecinde de elde edilebiliyor. Elde ediliş yöntemine bağlı olarak, bileşimi doğalgazınkine oranla daha büyük değişiklikler gösterebilmekte. Ancak, piyasalardaki LPG bileşimleri arasında, üretim sürecinden kaynaklananın dışında, kasıtlı bir fark yok. Var olan farklılıklar, kullanımda sorun oluşturmuyor. Çünkü ilgili donanım imalat sırasında, olası bileşim aralığının tümü için denenmiş halde. LPG sıvı olarak, litreyle ölçülüp kilogramla satılırken, diğeri gaz halinde m^3'le satılmakta. Çünkü propan 42°C'de, bütan 0°C'de kaynıyor ve birincisi standart koşullar altında zaten sıvı iken, ikincisi de, görece düşük basınçlarda kolayca sıvılaştırılabiliyor. LPG bu yüzden, kapsamlı boru hatlarının döşenmesine gerek kalmaksızın, sıvı halde, tanker veya gemilerle ekonomik olarak taşınabilmekte. Halbuki doğalgaz, yaklaşık -163°C'de kaynadığından, genelde sıvılaştırılmak yerine, boru hatlarıyla gaz halinde taşınıyor. Kriyojenik yöntemle sıvılaştırılıp, gemilerle nakli de mümkün ki, bu haline 'sıvılaştırılmış doğalgaz' (LNG) deniyor. LPG'nin enerji içeriği, doğalgazınkinden fazla: Aynı koşullar altındaki metreküp gaz başına yaklaşık 2,5 misli. Öte yandan, LPG gaz haline geçtiğinde havadan daha ağır: Doğalgazın özgül ağırlığı havanınkinin yarısı iken, LPG'ninki iki misli. Dolayısıyla, sızıntı olduğu takdirde LPG yerde birikiyor ve 'gaz kaçağı algılayıcılarının zemine yakın yerlere konulmasını gerektiriyor. Halbuki doğalgaz karışımı, havadan hafif olup yükseldiğinden algılayıcıları tavana yakın konumlara yerleştirilmek durumunda.

Son olarak, doğalgazın LPG'den daha güvenli olduğu söylenebilir. Çünkü LPG kadar enerji yoğun olmadığı gibi; doğalgaz dağıtım şebekesinden geliş basıncı, sıvı halde depolanan LPG'ninki kadar yüksek değil. Hem de LPG'ye oranla daha az paslandırıcı.

Dolayısıyla, doğalgaz sıvıları, birim hacim veya kütle başına, doğalgazın kendisinden daha bile değerli. Ayrıştırılmaları açısından genel kural şu: Yukarıdaki tablodan da görüldüğü üzere, molekül ağırlığı arttıkça, kaynama noktalan yükseliyor ve metandan ayrıştırılmaları kolaylaşıyor. Ayrıştırması en zor olanı, molekül ağırlığı açısından metana en yakın olan etan. Dolayısıyla, ham gazdaki etanın genelde %40 kadarı ayrıştırılıp, kalanı doğalgazın içinde bırakılır. Ancak ekonomik açıdan değdiği takdirde, daha fazlasının, kriyojenik genleşme yöntemiyle ayrıştırılması mümkün…

Bu yöntemde, ham gazın sıcaklığı ansızın -85°C'ye kadar düşürülüyor. Bu sırada, içerdiği ağır hidrokarbonların hemen tamamı sıvılaşırken, metan, gaz halinde kalıp ayrışıyor. Sıcaklığı düşürmenin yöntemlerinden biri 'turbo genleşme'. Bu teknikte ham gaz önce soğutucular kullanılarak bir miktar soğutuluyor. Sonra bir türbine gönderilip, basıncı ansızın düşürülerek genleştirildiğinde, türbine karşı yaptığı iş nedeniyle hızla soğuyor. Kaynama noktası görece çok düşük olan metan gaz halini korurken, ağır hidrokarbonlar sıvılaşıp ayrışıyor. Bunların daha sonra, kısmi damıtmayla kendi aralarında da ayrıştırılması gerekmekte. Türbinin kazandığı kinetik enerjiyi, kurutulmuş ve bu sırada basıncı düşmüş olan 'yarı işlenmiş gaz'ı tekrar sıkıştırmak için kullanarak enerji tasarrufunda bulunmak mümkün. Kriyojenik genleşme yöntemi, bir önceki yağa emdirme yönteminden daha etkin. Ham gazdaki etanın %90 ila %95'ini, daha ağır hidrokarbonlarınsa hemen tamamını ayrıştırabiliyor. Özellikle etanın yüksek oranla sıyrılması istendiğinde kullanılmakta.

Ham gazın kurutulmasından başka, bir de tatlılaştırılması, yani içeriğindeki hidrojen sülfidin ayrıştırılması gereği var. Tatlılaştırma işleminin ana yöntemi, nemin glikole veya ağır hidrokarbonların sıvı yağa emdirilmesine benzer şekilde. Bir kulenin üstünden verilen gaz, alt taraftaki amin çözeltisinin üzerinden geçiriliyor. Nasıl ki glikol suya karşı çekici ise, amin çözeltisi de gazdaki sülfür bileşenlerine karşı öyle. Kullanılan amin çözeltisi, monoetanolamin veya dietanolamin. Yönteme 'amin süreci' veya 'Girdler işlemi' de denmekte. Kuleyi terk eden gaz, içerdiği kükürt bileşiklerinin hemen tamamını, çözeltide bırakmış oluyor. Giderek doyan amin bileşenlerinin, emdikleri kükürt bileşiklerinin geri alınmasıyla 'yeniden canlandırılması' lazım. Bu bileşiklerdeki kükürt, ayrıştırılıp element haline getirilirse, satılabilir. Fakat bunun için ek bazı işlemler gerekiyor. Örneğin, kükürtün hidrojen sülfitten element olarak eldesi, 'Claus süreci' denilen bir dizi ısıl ve katalitik kimyasal tepkimeden oluşmakta. Bu süreçle, doğalgazın akışından emilen kükürtün %97'sini kazanmak mümkün. Kükürt ciddi bir kirletici olduğundan ve sağlık riski oluşturduğundan, ek olarak uygulanan filtreleme, yakma ve artık gaz temizleme işlemleriyle, bu oran %98'e kadar çıkarılabiliyor. Ham gazdan hidrojen sülfiti uzaklaştırmanın daha seyrek olarak kullanılan farklı bir yöntemi, demir süngeri gibi katı kurutucular kullanmak. Sünger şeklinin amacı tepkime yüzeyini artırmak.

Ham gaz nihayet, doğalgaz dediğimiz bileşime kavuşmuş oldu. Sırada nakli var...

DOĞALGAZIN TAŞINMASI

Doğalgaz boru hattı ağı üretim alanlarından toplama, tüketim merkezlerine iletim ve kent içi dağıtım ayaklarından oluşmakta. Toplama hatlarının başlangıcı, kuyuları gaz işleme tesisine bağlayan 1-2 cm çapındaki ince borular. Çaplar tesis çıkışında, 15 cm'den başlayarak büyüyor ve iletim hatlarında 120 cm'ye ulaşıyor. İletim hattının döşenmesi için önce hat üzerindeki engellerin temizlenip, bir ulaşım yolunun açılması lazım. Ardından boru parçaları getirilip, yol boyunca diziliyor. Parçalar imalat sırasında yalıtılmış. Hattın güvenlik açısından, toprağın en az 70 cm altına gömülmesi gerekmekte. Dolayısıyla, hat boyunca yaklaşık 2 m derinliğinde bir yarık açılıyor. Hattın dümdüz olması şart değil, yatay kavisler içerebilmekte. Boru parçalarını yukarıda kaynaklanıp, ek yerlerinin de yalıtılmasıyla elde edilen uzun kesimler, iki veya daha fazla sayıda kaldırma sistemi aracılığıyla, gerektiğinde esnetilerek yarığa indiriliyor. Yarıkta yapılması gereken kaynak işleri için yarığın o noktada çukurlaştırılması gerekmekte.

Akarsu geçişleri için suyun iki tarafından açılan eğik birer tünelin birleştirilmesiyle toprak altından ya da suyun içinden, yani dibin üstünden geçiş olmak üzere iki çözüm var. Bu ikincisinde, borunun yüzmemesi için etrafının betonlanması lazım. Montaj bitiminde basınçlı su testi yapılarak, sızıntı varsa bulunup gereği yapılıyor. Normal çalışma basıncı 15 ila 100 atmosfer arasında. Böylelikle doğalgazın hacmi 1/100'ine kadar inerken, hacimsel enerji yoğunluğu 100 misli kadar artmış oluyor. Doğalgazın uzun mesafelere iletilmesi bu sayede ekonomik...

Hat boyunca, gerektiğinde hattın bazın kısımlarının bakım onarım amacıyla devre dışı bırakılabilmesi için 8 ila 40 km'de bir birer vana konuluyor. Boru çeperindeki sürtünme nedeniyle uğranılan basınç kayıplarını telafi için arada, 60 ila 150 km'de bir, birer de pompalama istasyonu var. Pompalar santrifüjlü olup, motorla çalıştırılmakta. Motorlar elektrikli veya doğalgazla çalışan içten patlarlı türden olabiliyor ki bu ikinci durumda, hattan doğalgaz çekme gereği var. Hatta verilirken nemi alınmış olmakla beraber, borudan geçen gazın içerdiği nem oranı, yoğuşmaların birikimi sonucunda zamanla artabiliyor. Dolayısıyla metanhidrat oluşumunu engellemek için, bazı pompalama istasyonlarının yanında kurutma tesisi de kuruluyor. Bunlar, daha etkin olan katı kurutuculu kuleler.

Hattın uzunluğu boyunca bazı noktalarda ve hatta giren ya da çıkan kollarda ayrıca, gazın akışını etkilemeksizin debisini izleyen 'ölçüm istasyonları' var. Elektronik olarak alınan veriler bir kontrol merkezinde toplanıp, hattın herhangi bir kesimindeki gaz akışı her an için izlenebilmekte. Buna 'denetim amaçlı kontrol ve veri toplama' (*Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA*) sistemi deniyor. İletim hattından bir yerleşim merkezine dağıtım amacıyla çıkış alınırken, gaz basıncı düşürülüp, gerekirse son bir kez kurutuluyor. Bu aşamada içine, aksi halde renksiz ve kokusuz olduğundan, sızıntı durumlarının fark edilmesi için 'merkaptan'lar olarak da bilinen 'tiyol'lerin sarımsak kokulu olanlarından biri, çoğu zaman etanetiyol buharı katılıyor. Dağıtım hatlarında eskiden çelik borular kullanılırdı; şimdi güçlü plastik borular kullanılmakta. Boru çapları giderek küçülüp, 1-2 cm'ye inerek, bir iki atmosfer basınçla evimize, hatta ocağımıza kadar geliyor.

Doğalgaza talep yıl boyunca değişken. Genelde kışın fazla, yazın daha az. Ayrıca, aynı mevsim içerisindeki talep düzeyinde, günlük, hatta saatlik değişmeler de var. Belli bir mevsimin en düşük tüketim hızına 'temel yük' (baz yükü), en büyüğüne de 'zirve yük' deniyor. Boru hattı ağını zirve yüklere yanıt verebilecek boyutlarda tasarlamanın maliyeti aşırı yüksek olacağından, genel yaklaşım; yıllık ortalama tüketim hızını pompalama kapasitesiyle karşılayıp, zirve yüklerle aradaki farklar için gaz depolamak. Hal böyle olunca, bir de depolama gereksinimi doğuyor...

Doğalgazı depolamanın bir yöntemi, sıvı petrol gazı (LPG) eldesine benzer şekilde, kriyojenik genleşmeyle -160°C'ye kadar soğutup sıvılaştırmak (LNG). Böylelikle, gaz halindeykenki hacmini 600'de birine indirip, hacimsel enerji yoğunluğunu petrolünkinin yarısına kadar çıkarmak mümkün. Doğalgazın gemilerle nakli sırasında yapılan bu. Onca düşük sıcaklıktaki tanklar, kusursuz yalıtılmaları imkânsıza yakın olduğundan, dışarıdan az da olsa ısı almakta ve içerdeki gaz, yavaş yavaş buharlaşmaktadır. Buharlaşan gaz, tankta hapsedilmeye çalışılması halinde patlamaya yol açabilir. Dolayısıyla basınç denetleyici vanalar aracılığıyla sızmasına izin verilir. Sızan gazlar toplanıp, geminin kendi enerji gereksinimi için kullanılmakta. Benzeri bir tesisi karada kurmak da mümkün. Ancak bunlar düşük kapasiteli ve pahalı sistemler. Geniş kapasiteli depolar, yeraltında olanlar...

Doğalgaz yeraltında; eski doğalgaz yataklarında, yeraltı su havzalarında ve tuz birikintilerinde depolanabiliyor. Çekilebilir gazı tükenmiş olan eski gaz yataklarına yeni gaz pompalayıp depolamak en ucuz yöntem. Çünkü, depo önceden hazır ve gerekli donanım zaten üzerinde. Basılan gazın %50 kadarı, geri almayı sağlayan basınç farkının inşa edilip korunması için yeraltında tutulmak zorunda. 'Tampon gaz' denilen bu kısmı, ancak sahayı terk ederken çekmek mümkün. Yeraltı su havzalarının ise önceden depo olarak kullanılabilmeleri açısından, petrol ve doğalgaz aramalarındakine benzer, ayrıntılı bir şekilde incelenmeleri gerekiyor. Uygun bulunmaları halinde açılan kuyulardan içeri gaz pompalandığında, yeraltı suyu alçalarak, depolama hacmi oluşturuyor. Bunun için güçlü pompalar gerekmekte. Böyle bir havza bazı yerlerinden sızdırabildiğinden, buralarda 'toplayıcı kuyular'ın açılıp, sızan gazın yakalanması lazım. Saha sıfırdan geliştirildiği için en pahalı depolama yöntemi bu. Ayrıca, tampon gaz gereksinimi depolama kapasitesinin %80'ini bulabildiği gibi, tampon gazdan önce de, havzadaki boşlukları doldurmak için gaz pompalamak gerekmekte ve gazın bu kısmı geri alınamıyor. Son olarak, verilen gaz kuru olsa bile, su katmanıyla temas halinde bekletildiğinden, geri alımdan sonra tekrar kurutulması gereği var.

Yeraltı tuz birikintileri, yataklar ve kubbeler olmak üzere iki çeşit. Yataklar oldukça ince, en fazla 300 metre kalınlığında ve geniş alanlara yaygın. Kubbeler ise daha alt katmanlardaki tuzun buharlaşan suyla birlikte yükselip birikmesiyle oluşuyor ve 1,5 km'ye varan çap, 9 km'yi bulan yüksekliklere sahipler. Genelde yerin 500 ila 2.000 m altında bulunmakla beraber, bazen yüzeye ulaştıkları da oluyor. Tuz birikintisi ilk haliyle, çatlakları dışında gözeneksiz olup, geçirgen olmayan bir yapıya sahip. Dolayısıyla, içinde depo işlevini görecek olan bir 'tuz mağarası'nın oyulması lazım. Bunun için üzerinde açılan bir kuyudan içeri su pompalanarak dolaşım devresi oluşturuluyor ve eriyen tuz suyla birlikte yukarı taşındıkça, birikintide oyuk oluşuyor. Oldukça pahalı bir işlem. Fakat depo sızdırmaz olduğundan, tampon gaz gereksinimi az; toplam kapasitenin %30'u kadar...

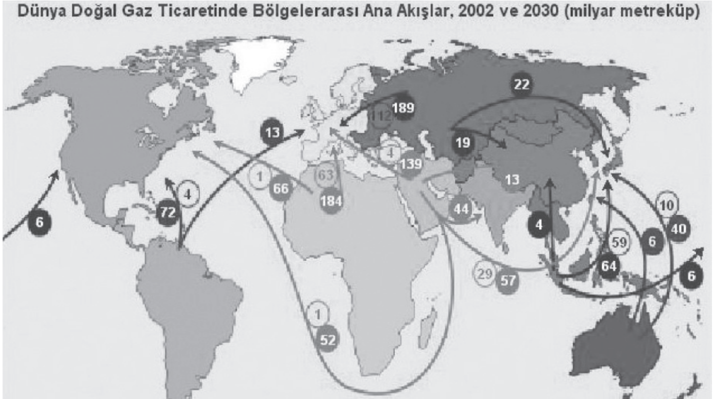
Eski gaz yataklarıyla yeraltı su havzaları, geniş kapasiteli depolar. Ancak gazın geri çekim hızı görece düşük. Bu nedenle, daha çok temel yükteki mevsimlik artışları karşılamak için kullanılmaya uygunlar. Tuz yatakları ise ince olduklarından düşük kapasiteli. Fakat gazın geri çekilebilme hızı yüksek. Bu nedenle daha çok gün içindeki yük değişimlerini karşılamakta kullanılıyorlar.

Doğalgazın enerji yoğunluğu 39 MJ/m^3, petrolünki 45 MJ/kg. Yani 1 m^3 doğalgazdaki enerji, 0,87 kg ya da yaklaşık 1 litre petrolde var. Dolayısıyla, petrolün hacimsel enerji yoğunluğu, doğalgazın 1.000 katı kadar. Petrolü uzun mesafelere taşımak, bu yüzden çok daha kolay. Doğalgazı ise, taşımadan önce yüksek basınçla sıkıştırıp, hacmini azaltmak gerekiyor. Taşıma borusu hatlarındaki 100 atmosferlik basınç, 1 atm'deki gaz hacmini %1'ine indirmekte (PV=nkT). Bu durumda dahi, birim hacim başına doğalgaz hâlâ petrolün 10'da biri kadar enerji yoğun. Dolayısıyla, doğalgazda enerji akışı yavaş olmak zorunda. Öte yandan, boru hatlarıyla petrol taşınırken sadece sürtünme kuvvetlerini yenecek kadar pompa gücü gerekiyor. Halbuki doğalgazda, sürtünme kayıplarına ek olarak, bir de gazı sıkıştırmak için pompa gücü lazım. Bu yüzden, küçük tüketicinin ödediği doğalgaz faturasının %47'si dağıtım, %19'u uzun mesafe nakil ve depolama masraflarından oluşabiliyor. Doğalgaz buna karşın, özellikle güç üretiminde hâlâ ekonomik. Çünkü bilindiği üzere, elektrik üreten termik santrallerde üretilen ısının 2/3 kadarı, elektrik üretimi döngüsünden 'artık ısı' olarak alınmak zorunda. Doğalgaza dayalı 'bileşik çevrim santralleri'ndeyse bir yandan elektrik üretilirken, diğer yandan bu artık ısı, örneğin civardaki fabrikaların süreç ısısı gereksinimini karşılamak için kullanılabiliyor. Hal böyle olunca, santral verimi %60'ı bulmakta. Öte yandan bu santraller 'toptan alıcı' olduklarından dağıtım masrafı ödemek zorunda kalmıyor ve sadece, yaklaşık %19'luk nakil ve depolama masrafını karşılamak zorundalar. Bu yüzden, toptan alıcılar için taşıma verimi %81 civarında. Bu oran %60'lık santral verimiyle çarpıldığında, toplam verim %48,6'yı buluyor. Halbuki diğer tip termik santrallerde, döngünün 2/3 oranındaki artık ısısı, kullanılamadığından atılmak zorunda. Dolayısıyla, verim %34 kadar. Buna bir de elektriğin iletim kayıpları eklendiğinde, santralda tüketilen enerjinin ancak %27'si prizlerimize elektrik enerjisi olarak ulaşabiliyor. Hele, doğrudan ısı üretimi amacıyla kullanıldığında, doğalgazın net enerji verimi; elektriğin %27'sine karşılık %81 ile; iki mislinden fazla. Isı üretiminde doğalgaz, petrol ve ürünleriyle de rahatlıkla yarışabiliyor. Çünkü, birim enerji başına maliyeti petrolden düşük. Örneğin, 160 litrelik 1 varil petrol, 1 atm basınçtaki 160 m^3 doğalgaza eşdeğer. Bu kadar doğalgaz; bin metreküpü, diyelim 280 dolardan 44,8 dolar eder. Halbuki petrolün varili şu sıralar, 60 ila 70 dolar arasında seyrediyor. Doğalgaz yalnızca kömürden daha pahalı; fakat buna karşılık, bu üç fosil yakıt arasında atmosfere en az kirletici yayanı.

Nitekim, doğalgaz kullanımı son yirmi yılda, dünya birincil enerji tüketimindeki payını hızla artırarak, yılda 2,8 trilyon metreküpe (Tmk) ulaştı. Bu eğilimin devam etmesi ve yıllık artış hızının; kömürde %1,9 ve petrolde %2,0 iken, doğalgazda %2,3 düzeyinde seyretmesi bekleniyor. Artışın yarıya yakını, doğalgaz santrallerinin, ilk yatırım maliyetlerinin görece düşüklüğü ve yapımlarının bir iki yıl gibi kısa bir sürede tamamlanabilmesi nedenleriyle, elektrik üretimine yönlendirilmekte. Türkiye de bu eğilimin içinde olarak, 2005 yılı itibariyle, 26.865 'milyar metreküp' (Gmk) doğalgaz tüketmiş.

Taşıma güçlüğü nedeniyle, doğalgaz daha çok üretildiği coğrafyalarda tüketiliyor. 2005 yılında dünyada tüketilen 2,8 Tmk doğalgazın %16 kadarı uluslararasında el değiştirmiş. Bu ticaret hacminin yalnızca %4 kadarı sıvı doğalgaz (LNG) şeklinde. Dünya doğalgaz pazarı, petrolde olduğu gibi bütünleşmiş değil; bölgesel pazarlar halinde. Kuzey Amerika, Avrupa ve bir de, yeni gelişmekte olan Doğu Asya pazarı var. Şekil 1'de, dünya doğalgaz ticaretindeki bölgeler arası ana akışlar görülmekte.

Belli bir havzanın doğal kapasitesinden bahsedilirken, yeraltında bulunduğu tahmin edilen gazın tümüne 'kaynak' ve bunun eldeki teknolojilerle çıkartılması mümkün görülen kısmına da 'rezerv' deniyor. Dünyanın bilinen doğalgaz kaynaklarının %38'i Rusya Federasyonu'nda, %25'i Ortadoğu'da. Bilinen rezervler 150 Tmk civarında. Bu rakama derinlerde ya da sıkıştırılmış halde bulunan veya 'metanhidrat'larda barınan 'alışılmadık gaz' rezervleri dahil değil. Ancak, bu rezervleri çıkarmak daha pahalı olduğu gibi, özellikle


Dünya Doğal Gaz Ticaretinde Bölgelerarası Ana Akışlar, 2002 ve 2030 (milyar metreküp)

Kaynak: World Energy Outlook 2004

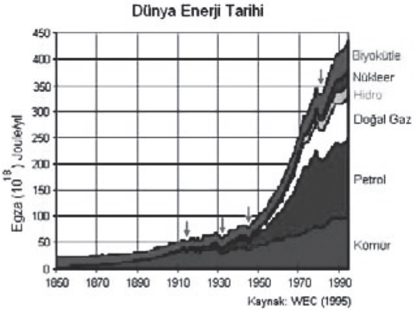
Şekil 1

metanhidratlarda bağlı olan gazı çıkarma girişimlerinin çevre etkileri kuşkulu.

Bir havzadaki rezerv miktarının, o havzadan yılda çekilmekte olan gaz miktarına oranına, 'rezerv kullanım oranı' deniyor. Bu oran Kuzey Amerika için 9, Avrupa için 24. Avrupa doğalgaz piyasasına hâkim olan Rusya Federasyonu için 80, Ortadoğu için 480 civarında. Dünya ortalamasıysa 70. Yani, bilinen rezervler şimdiki tüketim hızıyla 70 yıl yetecek kadar. Doğalgaz üretiminin 2020 yılından sonra Hubbert'in Zirvesi'ne ulaşması bekleniyor. Petrol için zirveye şu sıralarda ulaşıldığı sanılmakta. Bu tarihler biraz gecikebilir. Fakat biyoloji kökenli oluşum kuramının doğruluğu ve fosil yakıtların sınırlılığı varsayımıyla er ya da geç kaçınılmaz...

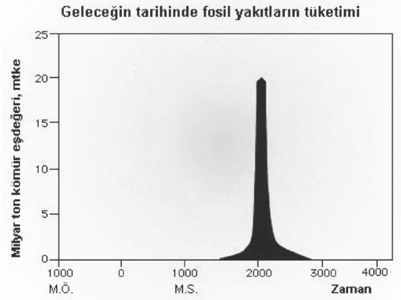
Şekil 2'de Dünya'nın geçmişteki enerji tüketim grafiği görülüyor. Enerji tüketimi 20. yüzyılda üstel bir artış izlemiş. Bu üstel artışın aksamış olduğu kırmızı oklarla işaretli bölgelere bakıp, 20. yüzyılın tarihini hatırlamak mümkün. Sırasıyla 1914 sonrasında I. Dünya Savaşı, 1930 sonrasında Büyük Kriz'in derinleşmiş hali, 1939 sonrasında II. Dünya Savaşı, 1979'da 'Petrol Şoku'nun yol açtığı ekonomik durgunluk dönemleri var. Grafiğin altındaki, herhangi bir yıla kadarki alan, o yıla kadar tüketilmiş olan toplam enerji miktarını veriyor. Asıl çarpıcı durum burada: II. Dünya Savaşı'ndan bu yana dünyamız, daha önceki tüm zamanlarda tüketmiş olduğu enerjinin yaklaşık 10 misli kadarını tüketmiş. Bundan sonrası?...

Dünya ekonomisi 20. yüzyılda, görece ucuz fosil yakıtlara sırt vererek büyüdü. Coğrafyalar arasında dengeli bir şekilde olmamakla beraber, ortalama refah ve tüketim aynı şekilde üstel olarak arttı. İnsanlık adeta, agar çözeltisinden bir damlaya rastlayıp etrafında toplanarak ziyafet sarhoşluğuna kapılmış bir bakteri kolonisi gibiydi. Temel sağlık hizmetlerinin yaygınlaşmasıyla nüfus, belki de tarihte daha önce hiç olmadığı kadar hızla çoğalıp 10 milyarı aştı. Bu 'başarılı' performansın ardındaki en önemli etkenlerden birisi, enerji kaynaklarının bolluğu ve ekonomilerin kısa dönemli iniş çıkışların dışında büyümeye devam edeceği beklentisiydi. Bu psikoloji sayesinde, başta parası rezerv olarak kullanılan ülkelerde olmak üzere, devletler ülkeler aşırı enf-


Dünya Enerji Tarihi

Kaynak: WEC (1995)

Şekil 2



Şekil 3

lasyona yol açmaksızın karşılıksız para basabildi. Bankalar, mevduat hacimlerinin ötesinde krediler açarak beklentileri finanse edebildi. Verimli bir döngü yaşandı ve Dünya, Hubbert'in Zirvesi'ne doğru hızla tırmandı. Fosil yakıtlara alternatiflerin geliştirilememesi halinde, yaşamakta olduğumuz 'ziyafet'in tahmine dayalı seyri Şekil 3'te görülüyor. Zirve sonrasında, aşağıya iniş sırasında, şimdi hâkim olan psikolojik beklentilerin tersine dönmesi kaçınılmaz. Enerji yetmezliğinden dolayı ekonomilerin giderek küçüleceği, küçülmesi beklenen bir geleceğe doğru para arzının ve kredilerin daralacağı; bunun da korkulan olumsuzlukları şiddetlendirerek, zirveye tırmanış sırasında yaşanan verimli döngüyü tersine bir kısır döngüye çevireceği endişeleri var. 'Kendi kendini gerçekleştiren kehanet'ler.

Kaldı ki, fosil yakıt kullanımından kaynaklanan sera gazı salımlarının iklim değişikliğine yol açtığı endişesi nedeniyle, bu yakıtların kalan rezervlerinin tüketim hızını frenleme yönünde çabalar var. Kyoto Protokolü doğrultusundaki bu çabalar giderek yoğunlaşıyor. Neydi onlar, sera gazları?...

ALTERNATİF KAYNAKLI KONUT GÜÇ SİSTEMLERİ

Rüzgâr, güneş ve biyogaz gibi alternatif enerji kaynaklarıyla, bir konutun enerji gereksiniminin önemli bir kısmını; hele yakında bir de su taşıma hızı yıl boyunca belli bir düzeyin altına inmeyen bir akarsu varsa, tamamını karşılamak mümkün. Kendine yeterlilik açısından en iyisi bunların, bir de fosil yakıt jeneratörüyle desteklenmiş bir karışımı –ki açık havalarda güneş panelleri, kötü havalarda da rüzgâr türbini başı çekerken; bu ikisinin yetersiz kaldığı durumlarda, diğer seçenekler devreye girebilsin.

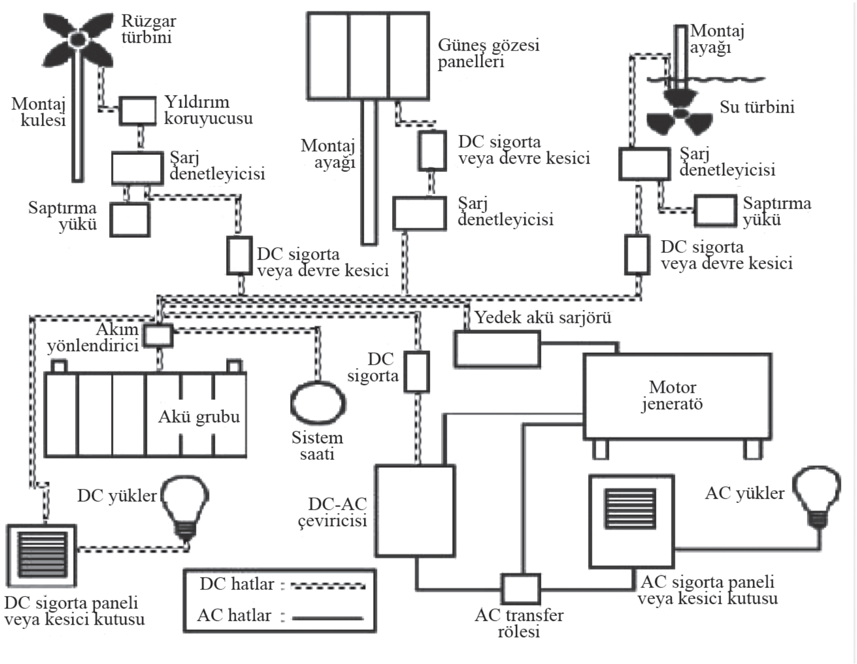
Şekil l'de; güneş, rüzgâr ve su bileşenlerinden oluşan, motor jeneratörle desteklenmiş, kendine yeterli bir bileşik konut güç sisteminin şeması veriliyor.

Dikkat edilecek olursa; buradaki alt sistemlerin hepsi, bir akü grubunun şarjına yardımcı oluyor. Fakat güneş gözesi panelleri DC; halbuki rüzgâr ve su türbinleriyle motor-jeneratör AC gerilimi üretiyorlar. Dolayısıyla ve akülerin şarjı DC gerilimiyle yapıldığından, güneş gözesi panelleri akülere doğrudan bağlanabilirken; diğer alt sistemlerin AC çıkış gerilimlerinin, akü grubuna iletilmeden önce DC'ye çevrilmesi, yani arada bir AC-DC çeviricisinin (*invertor*) bulunması gerekiyor.

Akü grubu daha sonra, konutun DC güç gereksinimini doğrudan, AC güç gereksinimini ise, DC-AC çeviricileri aracılığıyla sağlıyor. Sadece motor-jeneratör bileşeni, ürettiği AC gücünü, aynı tür gereksinime doğrudan yönlendirebiliyor. Bir yandan da diğer bileşenler gibi, gerek doğduğu zamanlarda akülerin şarjına yardımcı olabiliyor ve bunu, yedek akü şarjörünün içerdiği bir AC-DC çeviricisi aracılığıyla yapıyor.

Güneş gözesi panelleriyle diğer alt sistemler arasında, temel ve önemli bir fark daha var. İlki 'pasif', diğerleri ise 'aktif' üretici. Çünkü güneş gözesi panelleri, aküler doldurulmuyorsa eğer, yani akülere gidiş kapalıysa, oluşan ters gerilim nedeniyle elektrik üretemiyor. Halbuki su ve rüzgâr türbinleri, akülerin şarj gereksiniminden bağımsız olarak, rotor döndükçe elektrik üreten aktif üreticiler. Bu durum üretilen gücün yönetimini, aktif üreticiler açısından biraz karmaşıklaştırıyor. Çünkü şarj işlemi; akü grubunun çalışma ömrünün, tasarımlandığı kadar uzun olabilmesi açısından önemli. Bu işleme; hem akülerin enerji içeriği kapasitelerinin belli bir kesrinin altına inmedikçe başlanılmaması, hem de kapasiteye ulaştıktan sonra devam edilmemesi gerekiyor. Bunun için, akü grubunun girişindeki akım yönlendiricide, bir de akülerin gerilim düzeyini algılayan bir röle bulunuyor. Bu rölenin anahtarı; akülerdeki gerilim düzeyi kapasiteye ulaştığında açılarak, gelen akımı kesiyor veya alt sınırın altına indiğinde kapanarak akıma yolu açıyor. Akülerin sağlığını korumak için alınmış olan bu önlem, güneş panelleri açısından sorun oluşturmuyor. Çünkü akülere gidiş kapandığında, onlar zaten elektrik üretemiyor. Fakat rüzgâr veya su türbinlerinde, akülerin şarj edilmediği zamanlarda üretilen gücün, alternatöre zarar vermemesi için, akülerden saptırılıp bir başka şekilde kullanılması gerekiyor. Bu kullanıma 'saptırma yükü' deniyor ve aktif üretici sistemlerin çıkışında, pasif üretici panellerden farklı olarak, birer saptırma yükü bulunuyor.

Böyle, kendine yeterli bir konut güç sisteminin tesisi, yaklaşık şu aşamalardan oluşuyor:


Rüzgar türbini
Montaj kulesi
Yıldırım koruyucusu
Şarj denetleyicisi
Saptırma yükü
DC sigorta veya devre kesici
Güneş gözesi panelleri
Montaj ayağı
DC sigorta veya devre kesici
Şarj denetleyicisi
Montaj ayağı
Su türbini
Şarj denetleyicisi
Saptırma yükü
DC sigorta veya devre kesici
Akım yönlendirici
Yedek akü sarjörü
DC sigorta
Motor jeneratö
Akü grubu
Sistem saati
DC yükler
AC yükler
DC-AC çeviricisi
DC sigorta paneli veya kesici kutusu
DC hatlar :
AC hatlar :
AC transfer rölesi
AC sigorta paneli veya kesici kutusu

Şekil 1: Alternatif kaynak bileşenlerine dayalı bir konut güç sistemi.

1. Konutun gereksinim duyduğu güç düzeyinin belirlenmesi. AC ve DC bileşenlerini ayrı ayrı hesaplamakta yarar var –ki DC-AC çeviricilerin kapasiteleri belirlenebilsin. Bu aşamada; mevcut AC kullanımlarından bazıları DC'ye değiştirilebilir, enerji müsrif bazı uygulamalar gözden geçirilebilir. Sonuçta hesaplanan güç düzeyi, birkaç günlük elektrik tüketimini karşılayabilmek için gerekli olan akülerin, kapasite ve sayısını da belirleyecektir.
2. Civardaki alternatif enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi ve kullanılacak olanların seçilmesi. Bu aşama birkaç aylık, hatta yıllık ölçümlerle; örneğin suyun akış hacmi ve hızı, rüzgârın hızı gibi fiziksel değişkenlerin ortalama değerlerinin belirlenmesini gerektiriyor.
3. İlk aşamada belirlenmiş olan toplam güç talebinin, seçilen alternatif kaynaklar arasında paylaştırılması. Böylelikle, alt sistemlerin her birinin güç düzeyi belirlenmiş oluyor. Talebin karşılanmasında zorlanılıyorsa eğer; bir motor-jeneratör bileşeni, destek unsuru olmaktan çıkıp, zorunlu hale gelebilir. Ancak yakında yeterli su gücü varsa, 1 veya 2 küçük hidro türbin, talebin tümünü karşılayabilir.
4. Alt sistemlerden her birinin enerji üretim elemanlarının, kendilerinden beklenen güç düzeyinde hizmet verebilecek tür ve boyutlarda seçilmesi. Bu aşamada verilmesi gereken önemli bir karar da, sistemin şebekeye bağlı mı, yoksa tümüyle bağımsız mı olacağı. Çünkü bağlantıya izin varsa eğer, bir 'ara bağlantı-kojenerasyon' sistemi aracılığıyla, şebekeye elektrik satmak da mümkün. Bu durumda, bağımsız bir sistemin-kinden çok farklı elektronik donanıma gerek oluyor.
5. Maliyet/yarar analizi ve karar.
6. Söz konusu üretim elemanların temin ve tesisi.
7. Nihayet; konuttaki AC veya DC elektrik donanımlarının tasarımlanması ve yerleştirilerek, üretim sistemlerine bağlanması.

İyi bir tasarım yirmi yıl ve hatta daha fazla süreyle, güvenli ve bedelsiz elektrik üretimi sağlayacaktır.

Şimdi farklı güç üretim sistemlerini ayrı ayrı inceleyecek ve rüzgâr ve hidro bileşenlerine ağırlık vereceğiz.

KONUTLARDA RÜZGÂR GÜCÜ KULLANIMI

Rüzgâr türbinleri şebekeden uzak dağlık konumlarda, denizaşırı platformlarda ve rüzgârın eksik olmadığı hareketli teknelerde uygun bir enerji alternatifi oluşturuyor. Hele elektriksiz yörelerde, sadece su pompalama sistemlerine adanmış olarak çalışanları, önemli bir işlevi güvenle sağlayabiliyor.

Rüzgâr türbini esas olarak, rüzgârda dönen bir rotor ve buna bağlı bir alternatörden oluşuyor. Teknolojideki, verimi artırmaya ve hareketli parçaların sayısını azaltmaya yönelik gelişmeler, etkin ve güvenilir türbinler ortaya koymuş durumda. Tasarım ayrıntıları, güç düzeyine ve rüzgâr hızına bağlı olarak, tip ve modele göre değişiyor. En uygun modelin seçilme kararı, türbin konumunun ve bu konumdaki, ortalama ve en yüksek rüzgâr hızlarının, önceden yapılan ölçümlerle belirlenmiş olmasını gerektiriyor. Ortalama hızlarda en iyi performansı verebilecek ve en yüksek hızın yol açacağı kuvvetlere dayanabilecek olan tip ve model, ancak bundan sonra belirlenebiliyor.

Konumun, yakın bina veya ağaçlardan uzak, rüzgâra engel sunmayan açık bir alanda olması lazım. Öte yandan rüzgâr hızları genelde yükseklikle beraber arttığından, türbin, 10-12 metre civarında olmak üzere, ne kadar yükseğe yerleştirilebilirse o kadar etkin çalışabiliyor. Yüksek metal kuleler, yıldırımdan korunmak için paratoner gerektiriyor. Düşük rüzgâr hızları için tasarımlanmış olanları; ya daha uzun, ya da daha çok sayıda kısa ve geniş palalara sahip. Yüksek hızla çalışan türbinler ise daha dayanıklı malzemeden yapılmak zorunda. Rotorun aşırı yüksek rüzgâr hızlarında zarar görmemesi için, palalar dar ve görece daha kısa. Ev tipi olanlarını çatılara yerleştirmek mümkün. Bu amaca uygun montaj ayakları var. Ancak bu durumda türbin salınımları, binanın iskeletine de iletilmiş oluyor. Gerçi montaj ayaklarında genellikle, salınımları azaltan, şok emici lastik elemanlar var. Fakat yine de, ek bir maliyet getirmekle beraber, bağımsız bir montaj kulesi daha isabetli bir tercih. Öte yandan soğuk iklim bölgelerinde, kışın palalarda buzlanma olasılığı var. Hele rotorun hiç donmaması lazım. Dolayısıyla konumun, hava akımlarının karı dolandırarak getirip türbin gövdesinden içeri savurmayacağı bir yerde olması lazım. Soğuk iklimlerin buna karşılık bir de avantaji var: Havanın yoğunluğu arttığından, türbinler tasarımlarının öngördüğünden daha yüksek verimle çalışabiliyor. Türbinler düzenli bakım gerektirmemekle beraber, palaların yılda bir gözden geçirilmesinde yarar var. Çatlak bir pala hem tehlike oluşturuyor, hem de verimi düşürüyor.

Rüzgâr türbinlerinin çıkış voltajı, farklı tesisat gerilimlerine yanıt verebilmek amacıyla değişik olabiliyor. Küçük veya orta kapasiteli olanları genellikle 12 V, büyükleri ise 24 veya 48 V çıkış sağlıyor. Çoğu, AC-DC çeviricisini kendi yapısında içeriyor. İçermeyenler için, akülerle türbin arasına bir çevirici koymak gerekiyor. Bu çevirici çoğunlukla, bir şarj denetleyicisiyle birleştirilmiş oluyor ve türbinin kontrol ünitesini oluşturuyor. Saptırma yükü ise genellikle bir dirençten oluşuyor ve üzerinden geçen akımı ısı olarak çevreye yayıyor. Bazı türbinler, şarj denetleyicisiyle birlikte saptırma yükünü de içeriyor ve bu durumda, ürettiği akımın fazlasını, gövde kabının ısıtılmasına yöneltip, çevreye ısı olarak dağılmasını sağlıyor. Fakat çoğu türbin sisteminde, şarj denetleyici ve saptırma yükü ayrı bir birim olmak zorunda. Bu şarj denetleyicilerden bazıları, fazlalık akımı keza bir dirence yönlendirip ısıya dönüştürürken, bazıları su ısıtıcı bir direnç sarmalına, vantilatöre veya konut ısıtma elemanına yönelterek, daha yararlı ve verimli kullanım olanakları sunuyor. Böyle bir 'yük saptırıcı ve şarj denetleyici'nin türbinle akü grubu arasına yerleştirilmesinden sonra, konutun elektrik sistemi artık akülere bağlanabilir. Akü gerilimiyle çalışan DC elemanlar doğrudan, AC elemanlar bir çevirici aracılığıyla olmak üzere...

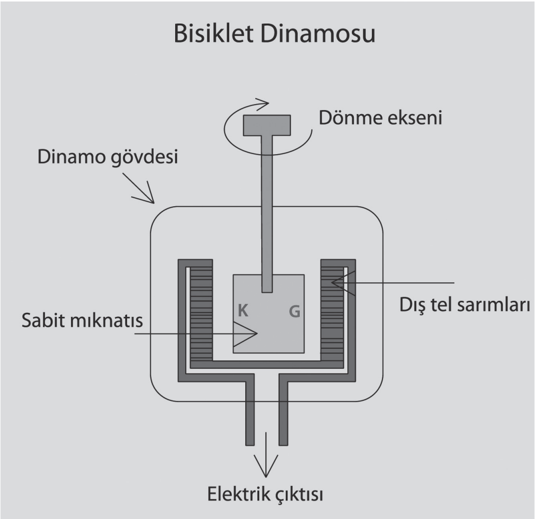
7 metreye varan kanatları dönme momentine karşı esnek. Kanatların ön kenarlarına, açı ayarı için ağırlıklar eklenmiş. Düşük rüzgâr hızlarında yüksek olan açı, ilk dönmeyi kolaylaştırıyor. Ancak yüksek hızlara ulaşıldığında, kanatlar dönme düzlemine doğru düzelerek, daha uygun bir aerodinamik şekil alıyor. 45-50 km hızlara ulaşıldığında ise, gövdenin arka ucundaki bir 'pasif koruma düzeneği' açılıp devreye girerek, 'kuyruk direnci' oluşturuyor ve yüksek hızdaki rüzgârın türbine zarar vermesini önlüyor. Hareketli parça sayısı sadece 4 ve programlı bir bakımı yok.

DİNAMO

Dinamonun çalışma ilkesi, Michael Faraday'ın keşfettiği 'endüksiyon yasası'na dayanır. Bildiğimiz gibi, iletken bir halka üzerinden akım geçirildiğinde, halka ekseni boyunca bir manyetik alan oluşur. Yani elektrik akımı manyetik alana yol açar. Faraday'ın endüksiyon ilkesiyse bunun tersine, manyetik alanla elektrik akımı arasında bir ilişki kurar. Şöyle ki, bu yasaya göre; iletken bir halkanın içinden geçen manyetik akının (Φ) yani manyetik alan şiddetiyle halka alanının çarpımının ($\int B.dA$) veya daha doğrusu manyetik alan şiddetinin halka alanı üzerindeki integralinin (İB.dA) zamanla değişmesi halinde, halka üzerinde bir gerilim ($V= -d\Phi/dt$) oluşur ve bu gerilim, yine halka üzerinde bir elektrik akımına yol açar.

Bu ilkeden hareketle gerilim elde etmek için; iletken bir teli halka şeklinde büküp, iki ucunu nötür ve faz olarak serbest bıraktıktan sonra halkanın karşısına, kutuplarından birisi halkaya bakacak şekilde bir sabit mıknatıs yerleştirmek ve mıknatısı, halkaya bakan kutbun sürekli değişeceği biçimde döndürmek yeterli. Öte yandan, bağımsız halkalarda oluşan gerilimleri üst üste bindirerek daha yüksek gerilimler elde etmek de mümkün. Bunun için, halkaları birbirine seri olarak bağlamak, yani bağımsız halkalar yerine, örneğin N sarımlı bir bobin kullanmak yeterli. Bu durumda gerilim düzeyi, tek bir halkadan elde edilebilecek olanın N misline ulaşır. Oluşan akım da keza, yaklaşık aynı oranda büyür.

Örneğin yandaki şekilde, basit bir bisiklet dinamosu görülüyor. Burada bir bobin içerisinde dönen sabit bir mıknatıs, bobinin iki



ucu arasında elektrik akımı oluşturuyor. Bu uçlar, örneğin bisiklet farının faz ve nötür uçlarına bağlanarak, farın yanması sağlanabilir. Mıknatısın dönmesi pedallara ugulanan dönme momenti aracılığıyla sağlandığından, pedallar ne kadar hızlı çevrilirse, bobindeki akı değişimi ve dolayısıyla üretilen gerilim veya akım da o denli yüksek olacak, far daha parlak yanacaktır. Eğer farın hep aynı parlaklıkta yanması isteniyorsa, dinamo-far devresine şarj edilebilir bir akü yerleştirilebilir ki, dinamo çalışırken aküyü şarj etsin; akü de, boşalmadığı sürece, farı sabit bir gerilimle beslesin. Bu durumda bisiklet dururken farın yanmaması için, devreye bir de açma-kapama anahtarının konması gerekir.

EVLERE YEDEK SU

Bir konutun su sistemi bilindiği gibi, bir tesisat giriş hattı ve bu hattan dallanıp budaklanarak tüm tüketim noktalarına ulaşan hatlardan oluşur. Su gereksinimini karşılamanın en yaygın yöntemi, böyle bir giriş hattını su şebekesine bağlamaktır. Şebekeden gelen bağlantı üzerine; önce gerektiğinde suyu kesmek için bir vana, sonra da faturalandırma amacıyla tüketim hacmini ölçen bir sistem sayacı konur. Bundan sonrası konuta aittir ve tesisat giriş hattını oluşturur. Hattın başlangıcına, konuta doğru tek yönlü bir vana (*jack-valve*) koymak lazımdır. Ola ki şebeke suyu kesilirse, tesisattaki su geri kaçmasın diye...

Bu durumda tesisat normal olarak, şebeke suyunun basıncı altındadır ve herhangi bir musluk açıldığında, şebekeden sürekli su akışı sağlanır. Bu basınç bazen düşmeler gösteriyor ve hatta sıfıra inebiliyor, yani su kesiliyorsa; şebeke arz güvenliğinin düşük olduğu söylenir. Böyle bir durumda tesisata, konutun acil su gereksinimini karşılayacak bir deponun konmasında fayda vardır. Bunun için genellikle, tesisat giriş hattı üzerindeki bir noktadan depoya doğru bir hat gönderilir ve tesisatın bundan sonraki herhangi bir noktasına, depodan gelen bir hat geri getirilir. Bunlar deponun giriş ve çıkış hatlarını oluşturur. Depoya giriş, deponun dolması istenen en fazla yüksekliğe yakın bir yerden açılır ki gelen su, depoda birikmiş suyun durağan basıncına karşı çalışmak zorunda kalmasın. Çıkış ise deponun dibine yakın bir yerden, ama dipte biriken tortuları emmeyecek şekilde, biraz yüksektendir.

Böylelikle, şebeke basıncının yeterli olduğu zamanlarda; hem musluklar açılınca sular akacak, hem de depo dolu değilse doldurulacaktır. Ancak, zaten dolmuşsa depoya su gönderilmemesi, taşmasına meydan verilmemesi gerekir. Bu amaçla depoya, ‘şamandıra’ denilen ve depo dolduğunda girişini tıkayan basit bir düzenek yerleştirilir. Bu düzenek çoğu zaman; diyelim ön ucunda içi hava dolu plastik veya kauçuktan yapılmış bir küre, arka ucunda ise, giriş ağzını tıkamaya uygun bir tıpa bulunan bir kol şeklindedir. Kolun arka ucu giriş ağzına bağlanmıştır. Öyle ki; bu uç sabit kalmak kaydıyla kol, dikey bir düzlem üzerinde inip kalabilmektedir. Dolayısıyla, depo dolu değilse; kol aşağıya doğru sarkık, giriş borusunun ağzı açıktır. Bu durumda; şebeke suyu da kesik değilse eğer, doldurma işlemi devam eder. Depo doldukça ön uçtaki şamandıra yükselip de kol nihayet yatay hale gelince, arka uç yukarı doğru dönüp, girişi tıkar. Depoya gelen su kesilmiştir. Bu, tuvalet haznelerindeki su düzeyini ayarlayan düzeneğin aynıdır.

Eğer tesisata bir depo konmuşsa, musluklarda yeterli basıncı oluşturmanın iki yolu vardır: Depoyu en az 30 m yüksekliğe yerleştirerek yaklaşık 2,8 kg/cm^2'lik bir tesisat basıncı yaratmak veya deponun altındaki çıkışa, 'basınç yükseltici' bir pompa yerleştirmek. Birinci seçenek garip görünebilirse de pek çok binada, örneğin yangın olasılığına karşı yedekte tutulan acil durum suyu, elektrik veya su tesisatlarının zarar görmesi halinde dahi erişilebilir olması için, yükseltilmiş bir depoda tutulur ve yerçekimiyle çalışabilir halde hazır bekletilir. Öte yandan, konut enerji sisteminin gücü düşükse, pompa ilavesi için sistemin kapasitesini artırmak yerine, depoyu yükseltmek daha ekonomik olabilir. Ancak; sistemin gücü yeterliyse veya şebeke gücüne erişim varsa, depo çıkışına pompa koymak, genelde daha kolaydır. Buna tesisatın 'ana pompa'sı denir.

Bu pompanın, sadece gereksinim doğdukça çalışmasında açık yarar vardır. Dolayısıyla önünde veya iç yapısında bir 'basınç anahtarı' bulunur. Konuttaki musluklardan herhangi biri açıldığında, bu anahtar tesisat basıncındaki düşüşü algılayıp, aksi halde durmakta olan pompayı çalıştırır. Böyle pompalara, 'talep üzerine çalışan' anlamında, 'talep pompası' veya yaygın deyimiyle 'hidrofor' denilir. Pompanın her musluk açıldığında çalışması da sağlıklı değildir. Çünkü, 'başlama-durma' döngüsü ne kadar sık tekrarlanırsa, pompa bileşenleri o kadar hızlı aşınır. Döngü sayısını azaltmak için, basınç anahtarının önüne, bir de 'basınç kabı' konur. Basınç kabı çoğu zaman; bir küre veya altı ve üstü dışa bombeli silindir şeklindedir ve konuttaki zirve tüketim hızı ne kadar yüksekse, o kadar büyük olmak zorundadır. Alt tarafından tesisat borusu girip çıkarak yoluna devam ederken; içinde ise, üst tarafında; tesisat için istenen basınç düzeyine kadar havayla şişirilmiş yeterince kalın lastik bir balon vardır. Pompa çalıştığı zaman kabı su doldurur ve bundan sonra sıkışmaya başlayan içerdeki balon, kaptaki suyu kendi basınç düzeyine kadar sıkıştırır. Bu aşamada tesisatın tasarım basıncına ulaşılmış bulunulduğundan, pompanın basınç anahtarı durumu algılayıp, pompayı durdurur. Bir süre için, musluklar açılıp kapandığında, gereksinim bu kaptaki basınçlı sudan karşılanacaktır. Pompa görevini yerine getirip uykuya dalmıştır, ta ki kaptaki su iyice azalıp da, basınç alt sınırın altına indiğinde, anahtar devreyi kapatıp, tekrar çalıştırana kadar...

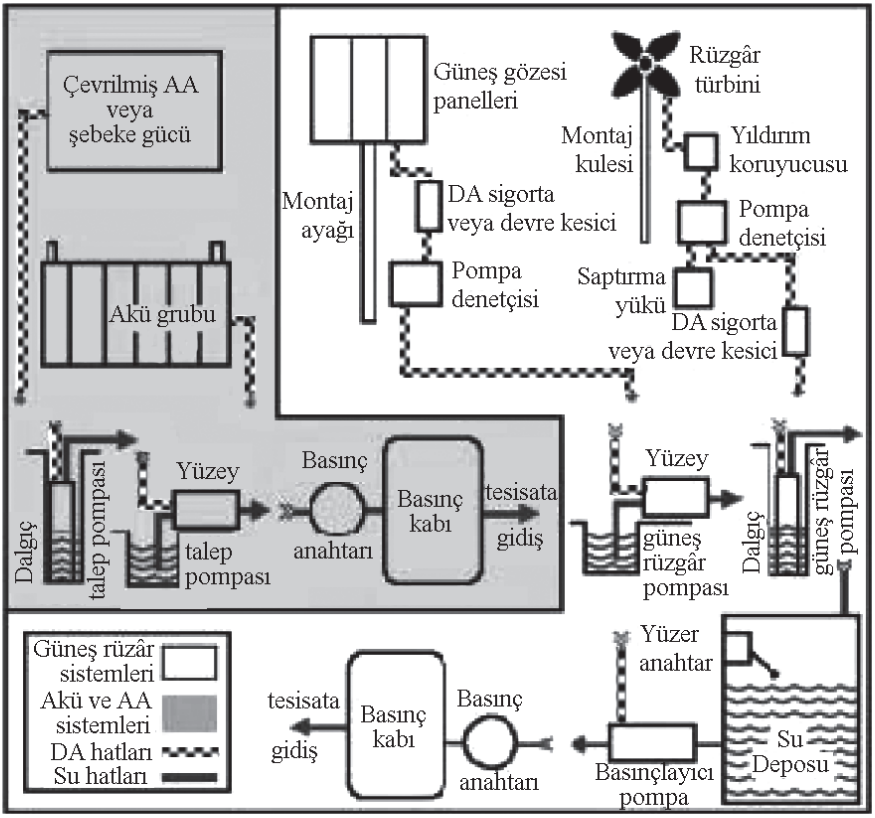
Diyelim şebeke suyu, bir süredir kesikti ve depodaki su da, en alt düzeye indi: Pompanın bu durumda da çalışmaması gerekir. Çünkü, hem dipteki tortuları emmek zorunda kalacak, hem de su düzeyi depo çıkış borusunun altına indikten sonra, pompalayacak su bulamayacaktır. Halbuki uzun süre kuru çalışan pompaların çoğu, aşırı ısınır ve bundan zarar görürler. Bu durumu önlemek amacıyla, depoya bir de 'yüzer anahtar' düzeneği yerleştirilir. Bu düzenekte, pompadan çıkan bir kablonun ucuna bağlı, içi hava dolu dikdörtgen prizma şeklinde küçük bir plastik veya kauçuk kutu bulunur. Kutunun içinde, serbestçe hareket edebilen metal bir bilye, orta kısmındaki hafif çukurlukta da, pompaya kumanda eden bir devre anahtarının iki metal plakası vardır. Kutu kablosuyla birlikte, deponun herhangi bir yanından aşağı sarkıtılarak, deponun boşalmasına izin verilen en alt düzeye kadar indirilip, kablo sabitlenir. Su bu düzeyin üzerinde ise; kutu suyun kaldırma kuvvetiyle, enlemesine yüzüyor olacak ve ortadaki çukurluğa yuvarlanan bilya, anahtarı kapatıp pompayı çalıştıracaktır. Su düzeyi alt sınırın altına indiğinde ise, kutu aşağıya doğru boylamasına sarkacak ve bilya kutunun dibine yuvarlanacağından, devreyi açıp pompayı durduracaktır.

Şimdi durumu hızla bir irdeleyelim: Şebeke basıncı yeterliyse, musluklar açıldığında tesisat basıncı değişmiyor. Basınç anahtarı herhangi bir düşüş algılamadığından, pompa çalışmıyor ve gereksinim doğrudan şebeke suyundan karşılanıyor. Şebekenin basıncı düşük veya suyu kesikse, musluklar açıldığında tesisat basıncı düşüyor. Basınç anahtarı bu durumu algılayıp, pompayı çalıştırıyor ve depoda yeterli su varsa eğer, gereksinim bu suyla karşılanıyor. Depodaki su da bitmişse, bu sefer yüzer anahtar pompayı kapatıyor. En kötü durum şu: Duşta yakalanmış olanlara, üzerlerindeki köpükleri sıvazlayıp sıyırmak ve kalan sabunla şampuanı yalamak kalıyor.

Dolayısıyla; her ne kadar bir konutun su gereksinimini karşılamak için, arz güvenliği yüksek bir şebekeye bağlanmak, en ekonomik çözümü oluşturuyor ve en yaygın olarak bu yöntem kullanılıyorsa da; eğer şebekeye erişim imkânı yoksa veya şebeke suyunda sık ve uzun süreli kesintiler yaşanıyorsa, konutun su açısından kendine yeterli olması istendiğinde, bu su; varsa yakındaki bir göl veya akarsudan, yoksa açılacak bir kuyudan sağlanabilir.

Kuyu suyunu veya eğer konuttan alçaktaysa, göl veya akarsudaki suyu tesisata iletmek için, pompalamak gerekir. Kuyularda bu, dalgıç; göl veya nehirde ise, yüzey pompalarıyla yapılır. Dalgıç pompalar, su derinliği 7 metreden fazla olan kuyularda kullanılır. Bazıları özellikle derin kuyular için tasarımlanmış olup, yüzlerce metre derinlikte dahi çalışabilir. Pompanın, kuyu derinliğine uygun tipte seçilmesi lazımdır. Yüzey pompaları ise, suyu yukarı doğru tırmandırmakta çok iyi olabilirler. Fakat yukarı doğru emmekte iyi değildirler. Bu tür pompalar, derinliği 7 metreden az olan kuyular, bir göl veya nehir için tasarımlanmışlardır.

Yaygın olarak kullanılan pompalar, elektrik ağından çekilen güçle çalışan alternatif akım pompalarıdır. Ancak AA pompalar, DA eşdeğerleri kadar verimli değildir. Dolayısıyla, şebeke elektriğine bağımlı olma durumunda dahi; alternatif güç bir çeviriciyle DA'ya dönüştürülebilir ve bir akü grubunun enerji depolama yeteneğine


Çevrilmiş AA veya şebeke gücü
Akü grubu
Güneş gözesi panelleri
Montaj ayağı
DA sigorta veya devre kesici
Pompa denetçisi
Rüzgâr türbini
Montaj kulesi
Yıldırım koruyucusu
Pompa denetçisi
Saptırma yükü
DA sigorta veya devre kesici
Dalgıç talep pompası
Yüzey talep pompası
Basınç anahtarı
Basınç kabı
tesisata gidiş
Yüzey güneş rüzgâr pompası
Dalgıç güneş rüzgâr pompası
Yüzer anahtar
Su Deposu
Basınçlayıcı pompa
Basınç anahtarı
Basınç kabı
tesisata gidiş
Güneş rüzâr sistemleri
Akü ve AA sistemleri
DA hatları
Su hatları

Şebeke elektriğine veya yenilenebilir kaynaklara dayalı birer konut su pompalama sistemi.

de bağlanılarak DA pompaların kullanılması yeğlenebilir. Halbuki eğer devrede zaten, örneğin rüzgâr veya güneşe dayalı yenilenebilir güç kaynakları varsa; DA pompaların kullanımı doğal tercihtir. Hem enerji hem de su gereksinimi açısından kendine yeterli bir konut, herhalde en idealidir. Aşağıdaki şekilde; derin veya sığ bir kuyudan, bir gölden veya akarsudan su pompalamak ve konut gereksinimine yönelik kaliteli bir su tesisatını çalıştırmak için gereken bileşenlerin ayrıntıları veriliyor. Gri fonlu kısım, çevrilmiş şebeke gücüne; beyaz fonlu kısım da, yenilenebilir güç kaynaklarına dayalı birer tesisatı betimliyor. Şimdi bu iki tesisatı sırasıyla inceleyelim...

Gri fondaki birinci tesisat, görece basit. Su gereksinimi, bir kuyudan dalgıç veya bir gölden yüzey pompasıyla karşılanıyor. Pompa DA olarak seçilmiş ve gücünü, şebeke elektriğinden bir çevirici aracılığıyla veya akülerde depolanmış olan enerjiden alıyor. Doğrudan şebeke elektriğini kullanan AA pompalar da seçilmiş olabilirdi. Nitekim bu tip pompalar, en verimlileri olmamakla beraber, en çok kullanılanları. Çünkü konutun elektrik sistemi sadece AA donanım için tasarlanmış ise, ayrı bir DA devresi yerleştirmek yerine, AA pompa kullanmak daha ekonomik olabiliyor.

Görüldüğü gibi, bu tesisatta bir su deposu yok. Çünkü kuyuda veya gölde her an için su bulunacağı ve konuttaki musluklardan herhangi biri açıldığında, pompaların çalışarak bu gereksinimi karşılayacağı varsayılmış. Dolayısıyla her iki pompanın da, tesisata doğrudan su verdikleri için, talep pompası olması lazım. Bu yüzden önlerinde birer basınç anahtarı bulunuyor ve ayrıca birer de basınç kabı var. Ancak, kuyunun m^3/dakika olarak su verimi, konutun zirve talep düzeyini karşılayamayacak kadar düşükse, acil gereksinimleri karşılamak için bir depo ile bu depoya hizmet eden başka bir ‘ana pompa’nın daha bulunması gerekirdi. Birinci tesisat bundan ibaret. İkincisi biraz daha karmaşık...

Bu tesisatta da su gereksinimi keza; bir kuyudan ya da göl veya akarsudan, dalgıç veya yüzey pompası aracılığıyla karşılanıyor. Ancak bu pompalar gücünü, güneş gözesi panellerinden veya su türbininden alıyor. Dolayısıyla iklim koşullarına bağlı olarak, değişik düzeylerde güç sağlayabiliyorlar. Bu yüzden, o anki güce bağlı olarak değişik hızlarda çalışmak üzere tasarımlanmışlardır. Yeterli gücü bulamayıp hiç çalışmadıkları zamanlar da olur. Bu yüzden talep pompaları olarak çalışmaları mümkün değildir ve olası güç yetersizliklerine karşı önlem olarak, bir su deposuyla birlikte kullanılmaları gerekir ki, suyun konuta ulaştırılmasından sonra, uygun bir miktarı bu depoda biriktirilip hazırda bekletilebilsin. Nitekim bu tesisatta bir depo var ve güneş veya rüzgâr pompaları, sağlayabildikleri güç oranında, hızlı veya yavaş çalışarak, hatta kâh durup, kâh kalkarak bu depoyu her an için dolu tutmaya çabalıyor. Deponun girişinde bir şamandıra var ve depo dolduğunda girişi kapatıyor. Acil su gereksinimi ise, deponun çıkışındaki bir diğer; talep üzerine çalışan, basınç anahtarlı ve basınç kaplı bir 'ana pompa' tarafından, depoda birikmiş olan suyla karşılanıyor. Tıpkı şebeke dışı bir konutun elektrik gereksiniminin bir akü grubunda depolanmış olan enerjiden karşılanması gibi…

Ana pompanın, tüm diğer talep pompaları gibi; ya en azından bir akü grubuna doğrudan veya çeviriciyle bağlı bulunan bir DA veya AA; ya da gücünü şebekeden veya bir motor-jeneratörden doğrudan veya çevirici aracılığıyla sağlayan AA veya DA pompası olması lazım ki, sürekli güç kaynaklarıyla çalışıyor olsun ve her an çalışabilir halde bulunsun. Öte yandan pompanın, depodaki su düzeyi alt sınırın altına indiğinde çalışamaması için, depoya sarkıtılmış uygun ayarlı bir yüzer anahtara bağlı olması gerekir.

Demek ki, su depoları veya tankları, pompalama imkânının iklim koşullarına bağlı bulunduğu güneş veya rüzgâr gücüne dayalı sistemlerde, konutun zirve talebini karşılayamayan düşük verimli kuyularda veya arz güvenliği düşük olan şebeke suyu kullanımında bir zorunluluk halini alıyor. Çünkü olumsuz hava koşullarına veya nadir gerçekleşen olumsuzluklara karşı sigorta niteliği taşıyor. Hem de böylelikle, su bir göl, nehir veya kuyudan çekiliyorsa eğer, depoda beklediği süre içerisinde, tortusunun çökelmesi sağlanmış olur. Daha sonra bir arıtma sisteminden geçirilerek, mutfak veya içme suyu olarak kullanılabilecek hale dahi getirilebilir. Yenilenebilir enerjiye dayalı bir sistemde, iklime ve su tüketim hızına bağlı olarak, 2-10 gün arası kullanıma yetecek kapasitede bir depo istenir. Dibinde, pompa çıkışının da altında, biriken tortuların yıkanıp atılabileceği ayrı bir tahliye çıkışı vardır. Üretimi düşük olan kuyularda, bir günlük gereksinime yanıt verebilecek, daha küçük bir depo kullanılabilir. Böylelikle, kuyunun hacimli bir kullanım sırasında kuruması önlenir. Bu önemlidir, çünkü çoğu pompa kuru çalışmaktan zarar görebilir. Diğerlerinin ise, kuyunun kuruması nedeniyle durduktan sonra başlatma koşullarını (*prime*) kaybetmesi söz konusudur. Yeniden çalıştırılmaları zor olur.

Dalgıç veya yüzey, rüzgâr veya güneş pompalarının da sürekli çalışmaması lazımdır. Çünkü depo dolmuş da girişi kapanmışsa, pompaların çalışmaya devamıyla yükselen basınç aşırı düzeylere ulaştığında, zorlanan pompalar zarar görebilir. Hele söz konusu olan, bir kuyunun dibindeki bir dalgıç pompa ise, bu durumun faturası ağır olur. Dolayısıyla pompanın önüne, çıkış hattı üzerine, bir 'basınç anahtarı' konulur. Bu anahtar; önündeki basınç, örneğin 2 kg/cm^2 gibi belli bir değerin altına indiğinde, devreyi kapatıp arkasındaki pompayı çalıştıracak ve basınç, örneğin 3-3,5kg/cm^2 gibi bir üst sınırı aşınca da, devreyi kapatıp pompayı durduracak şekilde ayarlanmıştır. Çoğu su tesisat pompasının iç yapısında bir basınç anahtarı zaten bulunur. Dolayısıyla ayrı bir anahtara gerek olmayabilir.

Dalgıç veya yüzey, güneş pompaları gücünü, DA güç üreten göze panellerinden aldıkları için, panellere doğrudan bağlı DA veya çeviriciyle bağlı AA tipinde olabilirler. Paneller pasif üretici olduklarından, saptırma gücüne gereksinimleri yoktur. Dolayısıyla, pompaların doğrudan bağlı DA tipi olanları, denetçisiz de çalışabilir. Ancak, güneş pompaları değişen hızlarla çalışabildiklerinden, panel çıkışına bir denetçi konması, daha sağlıklı bir tercihtir. Güneş pompası denetim elemanı, panel dizisinin güç çıkışını, pompanın işleyişini en iyileştirecek biçimde denetlemek üzere tasarımlanmıştır. Bazı güneş pompaları daha düşük ışık koşullarında çalışabilmek için, 'doğrusal akım yükseltici' (*linear current booster*) tipi denetçi gerektirir. Diğer güneş pompaları, denetçisiz çalışacak şekilde tasarımlanmışlardır.

Halbuki, dalgıç veya yüzey, rüzgâr enejisiyle çalışan pompalar gücünü, doğal olarak AA güç üreten bir rüzgâr türbininden alır. Dolayısıyla, türbine doğrudan bağlanabilen AA veya çeviriciyle bağlanabilen DA tipleri vardır. Öte yandan rüzgâr türbinleri aktif üreticiler olduklarından, bir saptırma yüküne bağlı olarak çalışmak zorundalar. Bu nedenle DA veya AA, her iki tipin de türbinden gücü, özel bir pompa denetçisi aracılığıyla alması gerekiyor. AA veya DA güç kullanımına bağlı olarak, iki tür pompa denetçisi var. Rüzgâr gücünün AA pompalarında doğrudan kullanımında, pompa denetçisi esas olarak, güç kalitesini denetlemek ve pompa durduğunda bu gücü saptırma yüküne yönlendirmek için kullanılır. Rüzgâr gücüne dayalı diğer pompalama sistemleri, DA motorlar daha verimli çalıştıklarından, DA pompa kullanır. Bu durumda pompa denetçisinin, türbinin AA gücünü DA'ya çevirmesi ve ayrıca bu gücü, gerektiğinde saptırma yüküne yönlendirmesi gerekir. Bazı rüzgâr türbinleri çeviriciyi yapısında içerir.

Son olarak; çoğu su tesisatı, ya polivinilklorit (PVC) veya polietilen (PE) borular kullanır. Esnek PE boruların avantajı, soğuk iklimlerdeki donma ve çözünme olaylarına karşı, sertliği nedeniyle çatlama riski taşıyan PVC borulara oranla daha dayanıklı olmalarıdır. Su basıncında sıçramalar oluşturan bazı pompaların çıkışında, şok emici nitelik taşıyan bir miktar esnek PE borunun bulunmasında yarar var. Bu, sistemin başka taraflarındaki sert boruların zarar görmesini önler. Hangi çeşidi kullanılırsa kullanılsın, boruların, suyun hacimsel akış hızına yanıt verebilecek çapta olmaları lazım. Öte yandan, su tesisatına bağlı elektrik hatlarının, güç sisteminin taşıdığı türden akıma uygun seçilmiş olması gerekiyor. Eğer tesisattaki elektrikli donanım AA ve DA bileşenlerin bir karışımından oluşuyorsa, hatların ayırt edilebilmesi için farklı renklendirilmiş veya işaretlenmiş olmaları da....

Bütün bu sistemler ve içlerindeki fıldır fıldır çalışan bileşenler olmasaydı, yalnızca su gereksinimimizi karşılamak için herhalde gün boyu çalışmamız, vanadan musluğa musluktan vanaya koşuşturup durmamız gerekirdi. Günlük yaşamımızda ‘çantada keklik’ saydığımız ve artık neredeyse kanıksamış bulunduğumuz bu unsurların buluşçularının hepsini saygıyla anmak lazım.

FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİ

Güneş gözelerinden oluşan paneller, güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviriyor ve bu nedenle, ‘ışık-elektrik’ anlamında ‘foto-voltaik’ler olarak da anılıyor. Yarıiletken teknolojisine dayanan gözelerden her birinin tek başına ürettiği akım ve gerilim, çoğu uygulama için fazla düşük. Gerilim düzeyini yükseltmenin yolu, gözeleri birbirine seri olarak bağlamak. Bu amaçla, genellikle 36 göze seri olarak birbirine bağlanıp, ‘modül’ denilen göze grupları oluşturuluyor. Akımı artırmanın yoluysa, modülleri birbirine paralel olarak bağlamak. Bu amaçla, gereksinim duyulan akım düzeyinin belirlediği sayıda modülün, öyle bağlanıp kullanılması gerekiyor. Bu modül grupları son olarak, sağlam bir çerçeve içerisine yerleştiriliyor ve çerçevenin arkasında, modül gruplarının ürettiği gücü kullanıma aktarabilmek için gereken artı ve eksi kutuplar bulunuyor.

Modül grupları hazır olduğuna göre artık; bir evin güç gereksinimini, güneş enerjisini elektriğe dönüştürerek karşılayabilmek için nelere dikkat edilmesi gerektiğine bakabiliriz.

Öncelikle, panel üzerine en fazla miktarda güneş enerjisinin düşebilmesi için, panel yüzeyinin bu ışınlara dik olması gerekiyor. Halbuki güneş ışınlarının yeryüzündeki herhangi bir noktaya düşüş açısı, hem gün boyunca, hem de mevsimden mevsime değişiyor. Dolayısıyla en ideal durumda panelin, güneş ışınlarını izlemesini sağlayacak bir ‘açı ayarlama düzeneği’yle donatılmış olması lazım. Ancak, panelin her an için gördüğü güneş enerjisi miktarının, o an için mümkün olan en yüksek düzeyde seyrini sağlayan böyle bir düzenek, oldukça pahalı bir donanım. Kullanılmaması halinde yönelinecek ikinci en iyi seçenek; panel açısını sabit tutmak ve bu açıyı, panelin her an için gördüğü olmasa bile, hiç değilse gördüğü yıllık ortalama güneş enerjisi miktarının en fazla olmasını sağlayacak değerde seçmek. Bu seçim, ekvatorda gayet kolay. Çünkü çatıdaki panelin, konutun bulunduğu noktada yerküreye teğet olan düzleme paralel olarak yerleştirilmesi yeterli. Diğer enlemlerdeyse, panelin teğet düzlemle yaptığı açının, o enlemin ekvatorla yaptığı açıya eşit olması ve kuzey enlemlerdeki panellerin güneye, güneydekilerin de kuzeye bakması gerekiyor. Fakat bu sabit açı, evin elektrik gereksinimi bir mevsimde diğerine göre değişiyor veya örneğin öğleden sonra, sabah saatlerine oranla daha fazla veya daha az ise; panelin hedeflenen mevsim veya saatlerde göreceği enerji miktarını en fazla kılacak şekilde farklı seçilebilir.

Modüllerin, hangi mevsim veya saatlerde olursa olsun, çevredeki ağaçlar veya yakındaki konutlar tarafından gölgelenmemesi lazım. Çünkü bir modüldeki, örneğin 36 gözeden sadece birisi gölgelenmiş olsa bile, o modülün güç üretimi %50'den fazla azalıyor.

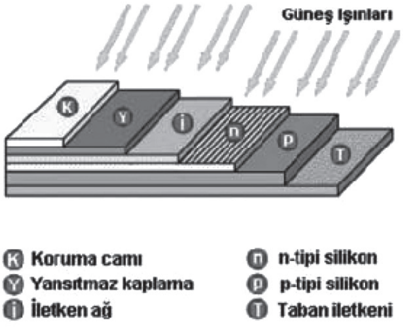
Panelin çatıdaki konum ve açısının belirlenmesinden sonra, sıra gereksinim duyulan sistemin büyüklüğüne gelmiştir. Bu büyüklüğün seçimi; bir hayli değişken olabilen ve her zaman da tam olarak öngörülemeyen hava koşulları yanında, konutun elektrik gereksiniminin zamanla değişken olması nedeniyle, karmaşık bir iş. Farklı coğrafya konumları için aylık ortalama güneş ışığı düzeylerini, meteoroloji verilerinden sağlamak mümkün. Bu veriler; yağmurlu ve bulutlu günleri, bulunulan enlemi, havadaki nem oranlarını ve ikincil diğer bazı faktörleri de hesaba katıyor olur. Bütün yıl boyunca yeterli elektriğin sağlanabilmesi için, en kötü ayın temel alınması gerekir. Öte yandan, panellerden beklenen güç gereksinimi bilinmektedir. Tüm bu verilerin ışığında, tasarımda kaç adet modülün kullanılması gerektiği, parmak kuralı benzeri basit yöntemlerle hesaplanabilir. Bir de sistem voltajının seçilmesi gerekir; ki bu, seri olarak bağlanacak modüllerin sayısını verecektir. Ayrıca, aletlerin çalışma voltajı panelinkinden farklıysa, trafolar da gerekecektir.

Öte yandan, evdeki aletlerin çoğu alternatif akımla çalışır. Şebekeden sağlanan güç de keza böyledir. Halbuki güneş panelleri doğru akım gücü üretir. Dolayısıyla alternatif güç kullanılmak istendiğinde, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren bir 'çevirici'ye gereksinim vardır. 'AA modülü' denilen bazı modüllerin iç yapısında, böyle çeviriciler zaten vardır. Bu, büyük ve merkezî bir çeviriciye gereksinimi ortadan kaldırır ve bağlantı şemasını bir hayli basitleştirir. Ancak büyük çeviricilerin, aynı zamanda sistem işleyişini otomatik olarak yönetme yeteneği de vardır.

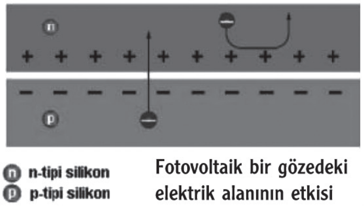
Geriye kalan en önemli sorun, panelin üretim yapmadığı güneşsiz günlerde ve gece karanlığında da, evin güç gereksinimini sağlamaya devam edebilmektir. Bu amaçla, şebekeye bağlanmak veya enerji depolayan aküler kullanmak gibi iki seçenek vardır. Şebekeye bağlanılması halinde, panel üretiminin yetersiz kaldığı zamanlarda şebekeden enerji çekilecek, aksi halde fazlalık üretim şebekeye verilecektir. Ancak, bölgedeki dağıtıcının buna izin vermesi gerekir. Dağıtıcılar, böyle küçük çaptaki üretim miktarlarını çoğunlukla, kendi satış fiyatlarının çok altında fiyatlarla satın alırlar. Ayrıca, satın alacakları gücün, şebeke gücüyle ‘senkronize’ olması, yani geriliminin dalga şekli ve frekansının, şebekedekiyle aynı olması lazımdır. Bu uyumu sağlayacak özel elektrik donanımının, evdeki sistemde bulunmasını şart koşarlar. Şebekeyle karşılıklı etkileşim açısından, göz önünde bulundurulması gereken bazı güvenlik sorunları da vardır. Örneğin bölge şebekesinde bir güç kaybı halinde, hatların tamirinin güvenli bir şekilde yapılabilmesi için, konuttaki panel sisteminin, tamir sırasında şebekeye güç vermeye kalkışmaması lazımdır. Konuttaki sistemin bağlı bulunduğu şebeke hattının ölü olduğunu belirleyip, panelin güç çıkışını kesen donanımın da bulundurulması, yani konut sisteminin ‘adalanması’ gerekir.

Şebekeye bağlanmak yerine akü kullanımının tercih edilmesi halinde, çözülmesi gereken başka sorunlar doğar. Örneğin, akülerin bakımına özen gösterilmesi ve ömürleri dolduğunda yenilenmeleri gerekir. Çünkü fotovoltaik modüller, 20 yıl veya daha fazla süreyle hizmet verebilirken, akülerin ömrü çok daha kısadır. Ayrıca, hem enerji depoluyor ve hem de asitli elektrolitler içeriyor olmaları nedeniyle, metalden yapılmamış ve iyi havalandırılmış bir bölmede saklanmaları lazımdır.

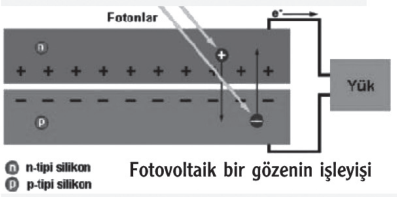
Sistemin hayata geçirilmesi için geriye artık; montaj elemanları, kablolar, bağlantı kutuları, topraklama donanımı, yüksek akım koruyucusu gibi bileşenler kalmıştır. Montaj sırasında üretici buyruklarına ve elektrik şartnamelerine uymak gerektiği gibi, bu işin fotovoltaik sistemler konusunda tecrübe kazanmış lisanslı bir elektrik



Silikon bir fotovoltaik göze elemanının temel yapısı



Fotovoltaik bir gözedeki elektrik alanının etkisi



Fotovoltaik bir gözenin işleyişi

ustası tarafından yapılması daha yerinde olur. Sistem montajdan sonra, özellikle eğer akü kullanılmamışsa, çok az bakım gerektirir ve yirmi yıldan fazla süreyle; sessiz, temiz ve ücretsiz elektrik üretir. Dolayısıyla, fotovoltaik paneller ideal birer enerji üretim aracıdırlar.

Ancak, sistem bir kez döşendikten sonra üretilen enerji ücretsiz olmakla beraber, donanım maliyeti bir hayli yükektir.

ELEKTRİK SİSTEMİ

Alıştığımız biçimiyle bir konutun elektrik gereksinimi, şebekeden çekilen alternatif akım gücüyle karşılanır ve bu güç konut içinde dağıtılarak; buzdolabı, televizyon, aydınlatma elemanları gibi aygıtların çalıştırılmasında kullanılır. Bu durumda aygıtların hepsi de, alternatif veya salınan akım gücüyle çalışır. Halbuki yenilenebilir kaynaklı bir konut enerji sisteminde güç, değişik birimler tarafından ve iki farklı türde üretilmektedir. Güneş panelleri doğru, rüzgâr ve su türbinleri ise salınan akım gücü üretir. Bilindiği gibi doğru akımda (DA), akımı oluşturan elektrik yükü taşıyıcıları, örneğin iletken bir metal tel üzerindeki elektronlar, hep aynı yönde veya ‘dosdoğru’ giderken; alternatif akımda (AA), gerilimin yönü belli bir periyotla değiştiğinden, bir ileri bir geri koşuşturup dururlar. Dolayısıyla, akımın zamana göre grafiği, birincisinde düz bir doğruyken, ikincisinde sinüs dalgası şeklinde salınımlıdır ve isimlendirmenin bu farkı betimlemesi gerektiği düşünülebilir. Ancak alternatif akım tarihsel gelişim süreci içerisinde, daha önce kurulmuş olan doğru akım ağlarına karşı yeni bir seçenek olarak ortaya çıkmış olduğundan, ‘alternatif sıfatıyla anılmaya başlanmış ve bu sıfat yanında kalakalmıştır. Aslında bu akıma, salınan ve salınımlı akım demek daha doğru olurdu.

Doğru akımlı elektrik; otomobillerdeki far, ışık ve radyo gibi elemanları çalıştırdığı gibi, bu tür elektrikle çalışan; konut aydınlatma elemanları, buzdolapları vs. de var. DA aygıtlar yaygın bir şekilde pazarlanmamakla beraber, bu ürünlerde uzmanlaşmış olan satıcılardan sağlanabiliyor. Dolayısıyla, konutta kullanılacak aygıtlar da keza iki tür, doğru veya alternatif akım gücüyle çalışıyor olabilir. Nitekim, çoğu yenilenebilir enerji sistemi, DA ve AA elektriğin her ikisini birden kullanır. Çünkü DA motorlar genelde daha verimli çalışır ve dolayısıyla DA ürünlerin hemen hepsi, eşdeğer AA ürünlere oranla daha yüksek enerji verimine sahiptir. Bu özellikleriyle, kapasitenin zorlanmaması açısından, yenilenebilir enerji sistemlerine daha uygundur. Hatta, kurulacak kapasiteyi daha küçük tutabilmek amacıyla; AA yüklerden, örneğin buzdolabı, çamaşır makinesi ve kurutucu, elektrikli ocak gibi yüksek güç gerektiren bazılarının, gazlı veya DA tipleriyle değiştirilmesi gerekebilir.

Ancak iki tür güç arasındaki fark önemlidir. Aygıtların veya hatların, yanlış türden akıma bağlanması, elektrik sistemine veya aygıtlara ciddi zarar verebildiği gibi, yaralanmaya neden olma veya yangına yol açma tehlikesi de taşır. Doğru veya alternatif, elektrik kullanan aygıtlardan her birine, sistemin sırtında taşımak zorunda olduğu birer 'yük' gözüyle bakılır ve bu durumda yükler, kullandıkları gücün türüne göre, 'doğru akım' veya 'alternatif akım' yükü olarak ikiye ayrılır. Çok çeşitli türleri var; mikrodalga fırınlar, saç kurutucuları gibi ev aletleri, müzik seti veya bilgisayar, aydınlatma elemanları, tamir aletleri ve kablosuz matkaplar, cep telefonları gibi. Hatlardaki kısa devreler gibi istenmeyen durumlar bile, sonuç olarak elektrik enerjisi tüketir ve dolayısıyla yük sayılırlar. Sonuç olarak; değişik birimler tarafından üretilen iki farklı türden gücün konuta iletilmesi, sonra da bu güçlerin, değişik türlerini kullanan yüklere, uyumlu bir şekilde dağıtılması lazımdır. Karmaşık görünen bu iş aslında, arada bir istasyonun varlığı nedeniyle basitleşir. Çünkü bir de, güç üretiminin yetersiz olduğu zamanlarda yükleri ayakta tutacak bir enerji deposuna gerek vardır ve bu görevi yerine getiren bir akü grubu, güç kaynaklarıyla yükler arasında bir istasyon oluşturur. Kaynaklar ürettikleri güçle aküleri doldurur, aküler de yükleri, doğrudan veya dolaylı olarak besler.

Aküler DA gerilimle doldurulup, öte yandan DA gerilim sağladıklarından, akü grubuna giren ve çıkan hatların hepsi DA gerilim taşır. Dolayısıyla, DA güç üreten güneş paneli gibi kaynaklar akülere doğrudan bağlanabilirken, rüzgâr ve su türbini gibi AA güç üretenlerin çıktısının, akülere ulaşmadan önce DA'ya çevrilmesi gereği vardır. Keza; aküler DA yükleri doğrudan besleyebilirken, AA yüklere sağladıkları gücün, bu yüklere ulaşmadan önce DA'ya çevrilmesi gerekir. Elektriğin iletim dağıtım ve denetimi için gerekli bu; örneğin kablolar ve anahtarlar gibi bileşenlerin tümü, 'elektrik sistemi' veya 'güç iletim ve dağıtım sistemi'ni oluşturur. Bu durumda, sistemi oluşturan bileşenlerden bazıları DA, bazıları da AA gerilim taşıyor olacak, yani sistem, DA ve AA olmak üzere iki alt sistemin bileşiminden oluşacaktır. Özelliklerinin farklılığı nedeniyle, sistemlerin birbirinden tümüyle ayrı tutulmaları, farklı renklerde çıkış ve kablolara sahip olmaları gerekir. Her hattaki tel kalınlığı, o hattın uzunluğuna ve taşıyacağı en yüksek akım düzeyine bağlıdır. Çünkü bilindiği üzere, iletken bir telin direnci, uzunluğuyla doğru, kesit alanıyla ters orantılıdır ve tel üzerinde oluşan ısı miktarı bu dirençle, etkin akım şiddetinin karesinin çarpımına eşittir. Dolayısıyla, telin boyu artıp kesit alanı küçüldükçe, aynı akım şiddeti altında daha fazla ısınır ve erimesi olasılığı doğar. En azından, plastik kaplaması zamanla sertleşip yalıtkanlığını yitirecek ve kısa devrelere yol açabilecektir. Dolayısıyla, DA ve AA sistemlerde kullanılacak olan gerilim düzeylerinin seçimi önemlidir. AA sistem için en uygun tercih, şebekeden de sağlanabilen 240 V düzeyidir. Bu durumda, AA güç kaynaklarının çıkışlarının 240 V'luk gerilim sağlaması ve alternatif akımla ilgili; çevirici, anahtar, sigorta gibi bileşenlerin de bu gerilime uygun olması gerekir. DA gerilim düzeyinin seçimi daha fazla dikkat gerektirir. Çünkü yaygın olarak kullanılan 12, 24 veya 48 V'luk düzeylerden hangisinin en uygun olacağı, DA sistemin özelliklerine bağlıdır.

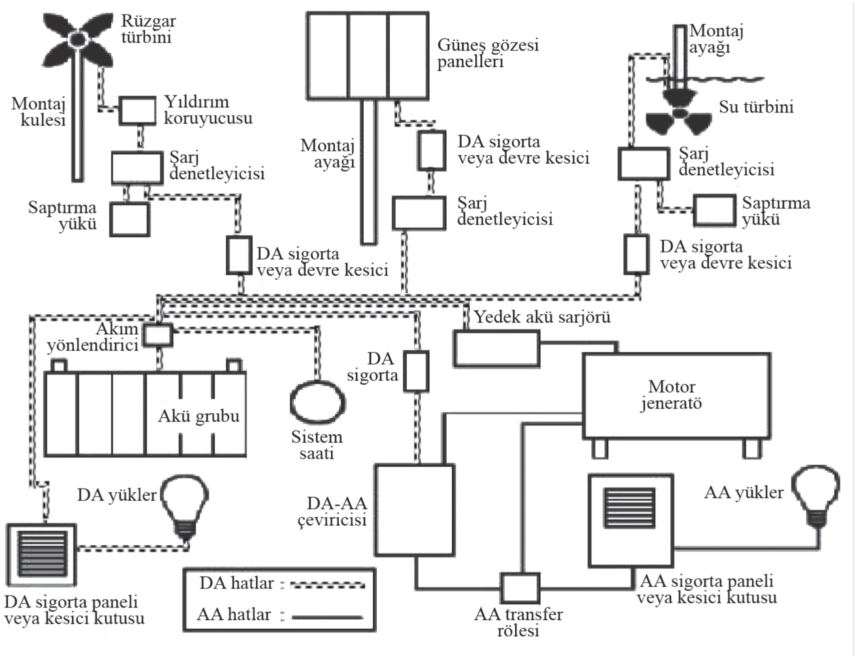
Herhangi bir elektrik sistemine verilen gerilim, üzerinden geçtiği kablo veya bileşenler üzerinde, dirençleriyle orantılı gerilimlere yol açar. Dolayısıyla girişteki gerilim yoluna devam ettikçe, azar azar da olsa azalır. Halbuki yüklere ulaşan gerilimin, ilgili aygıtları çalıştırabilecek düzey aralığında olması lazımdır. Yoldaki kayıpların girişteki gerilime oranı, giriş gerilimi ne kadar yüksekse o kadar düşük olur. Zaten, elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde AA'nın tercih edilmiş olması, öte yandan 240 V gibi yüksek bir gerilimin kullanılması, hep bu kayıpları en alt düzeyde tutabilme endişesinden kaynaklanmıştır. Dolayısıyla AA sisteminde bu açıdan pek ciddi sorunlar yaşanmaz. Çünkü giriş gerilimi, 240 V gibi yüksek bir düzeydedir ve kayıp oranı ciddi düzeylere ulaşmaz. Ancak, DA sistemi daha düşük gerilimle çalışacağından, kayıp oranı genelde daha yüksektir ve bu türden yüklerin çalıştırılmasında ciddi verim kayıpları söz konusu olabilir. Gerçi çoğu konuttaki DA sistemi 12 V'la çalışabilir. Ancak sistemdeki hatların boyu uzadıkça ve sistem büyüdükçe, 24 veya 48 V'u tercih etmek veya gerilim düzeyi zaten belirlenmişse eğer; daha kalın, yani direnci düşük kabloların ve kaliteli bileşenlerin seçilmesi gerekir. Hepsinin de, üzerlerinde oluşacak gerilim ve taşıyacakları olası en yüksek akım düzeylerine uygun niteliklere sahip olması lazımdır. Bu yüzdendir ki DA kabloların alımından önce, DA güç kaynağının en yüksek gerilim değerinin bilinmesi ve kabloların kat etmesi gereken mesafelerin ölçülmesi gerekir. DA hatlar daima, birden fazla telli bakır kablodan olmalıdır. Aynı verim kaybı endişesiyle; DA güç kaynaklarının kendilerinin, AA kaynaklarının ise çeviricilerinin konuta fazla uzak olmamasına özen gösterilir. AA kaynakların güç çeviricileri eğer alternatörün yapısında içeriliyorsa, türbinler konuta yakın konumlandırılır.

Sonuç olarak DA elektrik sistemi; hem DA kaynakların ürettiği veya AA kaynaklar tarafından üretilmiş olup da çeviricilerin DA'ya çevirdiği elektriği akü grubuna iletir, hem de akü grubunun çıkış gücünü, çalışır halde bulunan DA elektrik yüklerine aktarır. Akülerin sağladığı gücü, her biri farklı odalarda bulunan aygıtlara dağıtan çok sayıda hatta ayırmanın en güvenli ve düzenli yolu, akülerin çıkışına bir DA paneli yerleştirmektir. AA elektrik sistemi ise; şebeke, motor-jeneratör veya çevirici gibi AA kaynaklarından sağlanan elektriği doğrudan AA elektrik yüklerine veya AA-DA çeviricilerine taşır. Bu dağıtım işi de keza, bir AA panelinden başlanarak, düzenli ve güvenli bir şekilde yapılmalıdır. Çoğu DA veya AA paneli, ilgili sistemi aşırı elektrik yükünden korumak amacıyla, her devresine basit tel sigortaların veya yeniden kurulabilen (*reset*) devre kesicilerin yerleştirilmesine olanak tanır. Panel, o sistemin gerilimine ve karşılaşabileceği en yüksek akım düzeylerine uygun olmalıdır. Keza kablolar da...

DA sigortalar veya devre kesicileri, sistem bileşenlerini ve hatları aşırı akımdan korumak üzere, ana noktalara yerleştirilir. Her ikisi de aynı işlevi görürler. Tel sigortalar daha ucuz olmakla beraber, devre her aşırı yüklendiğinde eridiklerinden, değiştirilmeleri gerekir. Devre kesiciler ise; bazıları otomatik olarak yeniden kurulu hale gelir, bazıları da elle getirilebilir. Dolayısıyla tekrar tekrar kullanılabilirler. DA sigorta ya da devre kesiciler çoğunlukla; güç kaynağı devresine, çeviricinin DA giriş hattına ve DA panelindeki veya devre kesici kutusundaki her devreye konulur. Sigorta veya kesicinin, devredeki DA gerilime uygun seçilmiş ve devrenin tasarımlandığı en yüksek akım düzeyine dayanıklı olması lazımdır. Gerçi çoğu zaman; hem elektrik donanımı elemanlarının, yani hatlar, anahtarlar vs.'nin, hem de yüklerin üzerinde, AA veya DA kapasite değerleri belirtilmiştir. Fakat yine de, herhangi bir elektrik sisteminin lisanslı elektrikçiler tarafından ya da onların denetiminde, şartnamelere ve üretici firma talimatlarına uygun olarak döşenmesi gerekir.

Şimdi bu açıklamaların ışığında, yenilenebilir kaynaklı ve kendine yeterli bir konut elektrik sistemi tasarımını, daha önce verilmiş olan aşağıdaki şekilden izleyebiliriz.

Buradaki yenilenebilir enerji kaynakları; güneş panelleri ile, rüzgâr ve su türbinlerinden oluşuyor. Bu üçü; güneş, rüzgâr ve su gücüne dayalı akü yükleyicileri olarak düşünülebilir. Rüzgâr ve su türbinleri doğal olarak AA gücü ürettiklerinden, ürettikleri gücün DA'ya çevrilmesi gerekiyor. Halbuki burada türbin güç çıkışları kırmızıyla, yani DA olarak gösterilmiş. Bu, alternatörlerinin yapısında AA-DA çeviricilerinin zaten bulunduğu anlamına geliyor. Rüzgâr türbinleri genellikle 15 km/saat veya daha yüksek rüzgâr hızları gerektirdiklerinden, 10-30 m arası yüksekliğe sahip bir montaj kulesinin üstüne yerleştirilirler. Çoğunlukla metal olan bu kuleler yıldırım çekebildiklerinden, sistemin bir paratonerle korunması gerekir. Öte yandan, rüzgâr ve su türbinleri aktif üretici olduklarından, aküler dolduğunda elektrik üretiminin yönlendirileceği birer saptırma yüküne bağlı olmak durumundadırlar. Saptırma yükü, 'yük saptırıcı şarj denetçisi'ne bağlı ve denetçi, aküler tümüyle dolu olduğunda, aşırı yüklenmemeleri için, su veya rüzgâr türbininin ürettiği fazlalık gücü bu yüke gönderir. Bazı saptırma yükleri sadece, güç fazlasını ısı olarak yayan büyük dirençlerden oluşur. Bu tipler fazla ısınabildiklerinden, yangın tehlikesinden uzak konumlarda yerleştirilmeleri gerekir. Diğer bazı sistemler, konutun iklim koşullama sistemini saptırma yükü olarak kullanır ve fazlalık gücü yararlı bir biçimde kullanır. Saptırma yükü olarak iki kullanım önerisi: Bir DC su ısı-


Rüzgar türbini
Montaj kulesi
Yıldırım koruyucusu
Şarj denetleyicisi
Saptırma yükü
DA sigorta veya devre kesici
Güneş gözesi panelleri
Montaj ayağı
DA sigorta veya devre kesici
Şarj denetleyicisi
Montaj ayağı
Su türbini
Şarj denetleyicisi
Saptırma yükü
DA sigorta veya devre kesici
Yedek akü sarjörü
Akım yönlendirici
Akü grubu
Sistem saati
DA sigorta
Motor jeneratö
DA-AA çeviricisi
DA yükler
AA yükler
DA sigorta paneli veya kesici kutusu
DA hatlar :
AA hatlar :
AA transfer rölesi
AA sigorta paneli veya kesici kutusu

tıcısı, ya da güç merkezini oluşturan oda için ısıtma havalandırma sistemi. Sistem tasarımı sırasında saptırma yükünün, rüzgâr ya da su türbininin üretebileceği en fazla gücü kullanabilecek büyüklükte seçilmesi gerekiyor. Yukarıdaki tasarımda saptırma işini, her iki türbine de bağlı birer 'yük saptırıcı şarj denetçisi' yapıyor. Bu denetçi bazı rüzgâr türbinlerinde zaten varken, bazı diğerlerinde, dış bir birim olarak yerleştirilmek zorunda. Su türbinlerinin hemen hepsi bir dış denetçi gerektirir.

Halbuki güneş panellerinin, zaten DA güç ürettiklerinden, çeviriciye; pasif üretici olduklarından dolayı da, saptırma yüküne ve saptırıcıya gereksinimleri yok. Dolayısıyla, güneş panellerinin güç çıkışında, sadece akülerin yük durumunu kollayan bir şarj denetçisi bulunuyor. Bu denetçi aküler dolu olduklarında, aşırı doldurma çabasını engellemek amacıyla, akülere giden akımı kesiyor. Çoğu güneş paneli denetçisinde aynı zamanda, geceleri panelleri akülerden kesecek diyot veya röleler de vardır. Çünkü aksi halde, konutta fazla gücün kullanılmadığı bu saatlerde, akülerden panellere geriye doğru bir akım, aküleri boşaltabilir. Güneş denetçilerinin iyi modelleri akım miktarını ayarlamak için; akülerin daha hızlı ve verimli bir şekilde doldurulmasını sağlayan, 'salınım eni ayarlayan' (*pulse width modulated-PWM*) şarj devreleri kullanır. 'Zirve güç noktasını izleme' (*maximum power point tracking-MPPT*) teknolojisi adı verilen en yeni teknolojiyse, gerilimi ayarlayarak, şarj akımını o an için uygun olan en yüksek düzeyinde tutar. Denetçinin, akülerle panellerin gerilimine ayarlanmış olması ve panellerin en yüksek üretim düzeyine yetecek akım kapasitesine sahip bulunması gerekir. Daha sonrası için ek paneller planlanıyorsa, kapasite artırıldığında bir yenisini almak zorunda kalmamak için, büyüme yeteneği olan bir denetçi tercih edilebilir.

Güneş panellerinin çıkışında ayrıca, su ve rüzgâr türbini devrelerinde olduğu gibi, güç üretimindeki aşırı sıçramalara karşı tesisatı koruyan bir sigorta veya devre kesici var. Bu üç üreticinin her birinden gelen DA gerilimler aynı olmak zorunda. Ancak akımlar farklı olabiliyor ve bir akım yönlendiricide (*shunt*) bir araya geliyorlar. Her biri ayrı ayrı denetimden geçmiş oldukları için, akım toplamı da denetlenmiş oluyor. Akım yönlendirici; bir yandan DA paneli üzerinden DA yükleri besliyor, diğer yandan da; DA yüklerden geriye kalan güçle, eğer dolmamışlara, aküleri şarj ediyor. Veya güç üretimi yetersiz kalmış ve aküler boşalmamışsa, akülerden çekilen gücü; DA yüklere doğrudan, AA yüklere de bir çevirici üzerinden yönlendiriyor. Sonuç olarak AA yükleri de besliyor. Aynı zamanda sistem sayacına bağlı. Çünkü yönlendirici, üzerinden geçen akıma göre çok küçük bir gerilim oluşturan çok duyarlı bir dirence sahip. Sistem sayacıyla birlikte kullanıldığında, sistemdeki akımın tümü üzerinden geçecek şekilde bağlanıyor. Sayaç, duyarlı direnç üzerindeki gerilimi ölçüyor ve bu veriyi, güç sisteminin genel performansını değerlendirmek için kullanıyor. İyi bir akü sistemi sayacı; sistemin sağlamakta ve konutun kullanmakta olduğu güç düzeylerini, sistem gerilimini, amper akışlarını ve akülerin şarj durumunu izler. Büyük bir akü grubunun sistem sayacı, akülere gelen ve akülerden çekilen amper-saatlerin farkından hareketle şarj durumunu hesaplayabilmelidir de. Bazı sistem sayaçları, masaüstü bir bilgisayarla arayüzlendirilebilir. Böylelikle güç sistemi verileri kaydedilip, zamana yaygın performans analizleri yapılabilir.

Kullanılacak akülerin, amaca uygun tipte olması; görece düşük düzeydeki bir akımı, gerektiğinde, konut talebinin zirveye ulaştığı saatler boyunca sağlayabilmesi gerekir. Bu sırada, depoladığı enerjinin önemli bir kısmını yitirecek ve talep düştükten sonra, üretim birimleri tarafından tekrar doldurulmaya başlanacaktır. Yani akülerin içerdiği enerji miktarındaki değişiklikler büyük, gerilim düzeyindeki dalışlar derindir. Böyle akülerin enerji döngüsünün ‘derin’ olduğu söylenir. Konut güç sistemlerinde kullanılan akülerin hepsi bu türden, yıllar boyunca doldurulup boşaltılabilen ‘derin döngü’ aküleridir.

En yaygın olarak kullanılan derin döngülü aküler; kapalı veya havalandırmalı tiplerde olabilen ‘kurşun asitliler ile ‘nikel kadmiyum’ aküleridir. Bu ikinciler daha pahalı olmakla beraber, daha uzun ömürlüdür. Bir akünün potansiyel ömrünü, üretim sonundaki yapısı; fakat bu potansiyel ömrün hangi oranda gerçekleşeceğini, yani uygulamadaki ömrünü ise, kullanılma biçimi belirler. Örneğin bir akünün, zaten doluyken hâlâ doldurulmaya çalışılması veya enerji kapasitesinin çok büyük oranlarda boşaltılması, uygulamadaki ömrünü kısaltır. Nikel kadmiyum akülerin içerdiği enerjinin çok daha büyük bir kısmı, dayanıklılıklarına zarar vermeksizin boşaltılabilirken, derin döngülü kurşun asitli akülerde bile bu işlem, ömürlerini kısaltmaksızın yapılamaz. Bu nedenle, kurşun asitli akülerin kullanımı genellikle; akünün enerji içeriğinin, kapasitesinin altına, %40-50’den daha fazla inmeyecek biçimde tasarımlanır. Ayrıca, akünün aşırı doldurulmaya çalışılması veya boşaltılmasını engelleyecek şarj denetçilerinin kullanımı, akünün uygulama ömrünü uzatır. Bu donanım, aküler dolduğunda, akülere gelen akımı keser. Önceden belirlenmiş bir düzeyin altına indiğinde de, ki bu akünün çıkış geriliminden anlaşılır. Akü yeniden belli bir miktar dolduruluncaya kadar aküden çekilen akımı keser. Şarj denetçisi kullanımı, uzun akü ömrü için şarttır.

Akü grubu fazlalık elektriği, gereksinim doğana kadar depolar. Çok çeşitli tip ve büyüklüklere sahiptirler. Seçilecek tipin, konutun gerektirdiği amper-saat kapasitesine ve sistem gerilimine uygun olması gerekir. Kaliteli bir akü grubu pahalı olmakla beraber, uzun dönemli kullanım için en iyi yatırımı oluşturur.

Şeklimize geri dönecek olursak; akım yönlendirici bir yandan da AA yükleri besliyor. Bunun için, üretim birimlerinden gelen ya da akülerden çekilen gücün gerektiği kadarını, bir sigorta üzerinden DA-AA çeviricisine gönderiyor. Çevirici uygun AA gerilimi sağlamak ve aynı anda kullanılması planlanan tüm AA yüklere güç sağlamak için yeterli çıkış kapasitesine sahip olmak zorundadır. 'Çevirici çevirici' deyip duruyoruz da, ne menem şeydir bu aygıtlar, biraz bakalım...

AA gücü DA'ya çevirmek için; sinüs dalgasının zamana göre salınımlı grafiğinin, üst yarı düzlemdeki yarım periyotluk yarılarını alt yarı düzleme indirmek veya bunun tersini yapmak yeterli. Bir AA-DA çeviricisi bunu en basit olarak, akımı tek yönde geçiren bir diyot aracılığıyla başarır. Çıktısı; genliği değişebilmekle ve hatta yarım periyotluk sürelerle sıfır düzeyinde seyretmekle beraber, hep aynı yönde giden bir akımdır. Bu durumda, akımın taşıdığı gücün yarısı ziyan olur. Çevirme işlemi; gelen sinüs dalgasının ya alt ya da üst yarılarının yönünü değiştirip, her ikisini de yoluna devam ettirmek suretiyle de yapılabilir. Bu iş biraz daha zordur ve böyle çalışan çeviricilerin yapısı, doğal olarak daha karmaşık olur. Bu durumda, gelen akımın taşıdığı gücün hepsi kullanılır, tek yönlü çıkış akımının genliği zamanla, daha az şiddetli değişimlere uğrar. Gerçi genlik her iki durumda da sabit değildir ve elde edilen akım, 'yaklaşık' bir doğru akım olur. Fakat DA aygıtlar, genlikteki bu hızlı değişimleri algılamakta zorlanacakları gibi, çoğu zaman değişken hızlarla çalışacak biçimde tasarımlanmış olduklarından, bu yaklaşıklıktan etkilenmezler.

DA gücü AA'ya çevirmek ise; doğru akımın zaman üzerindeki dümdüz grafiğini eşit aralıklarla dilimleyip, art arda gelen her iki dilimden birincisini veya ikincisini, fakat hep aynı sıradakini, grafiğin üst yarı düzleminden kaldırıp alt yarı düzleme indirmekle mümkündür. Bir DA-AA çeviricisi bunu; girdisini oluşturan doğru akımın yönünü, zamana bağlı olarak ve hedeflenen frekansa karşı gelen bir periyotla, bir tersine çevirip bir aynı bırakarak ve bu iki basit adımı hep tekrarlayarak yapabilir. Dolayısıyla, çıkışındaki akımın grafiği; enleri ve genlikleri ayrı ayrı birbirine eşit olan, sırasıyla 'negatif ve pozitif yönlü' dikdörtgen pulslardan oluşur. Bu çıktıya 'kare puls dalgası' denilirse de, pulslarının aslında kare olması gerekmez. Fakat köşeleri bir sinüs dalgasınınki gibi tatlı kavisli olmamakla beraber, 'yaklaşık' bir AA akım oluşturur. Halbuki böyle bir 'köşeli puls dalgası'; kendi frekansının tamsayı katlarıyla çakışan daha yüksek frekanslara sahip bulunan, gerçi genlikleri frekansla azalan, çok sayıda sinüs dalgasının üst üste bindirilmesiyle de oluşturulabilir. Hal böyle olunca da, yaklaşık bir sinüs dalgası, bir sürü farklı frekanstaki gerçek sinüs dalgasının varlığına eşdeğerdir.

Bazı DA-AA çeviricilerinin, aldıkları DA elektrikten ürettikleri alternatif akım, 'yaklaşık sinüs dalgası' (*modified sine wave*) şeklindedir. Dolayısıyla ürettikleri akım, tek bir frekansa sahip bir sinüs dalgası değil de, çok çeşitli frekanslara sahip bir dalga bohçası gibi etki verir. Bazı çeviriciler ise 'gerçek sinüs dalgası' (*true sine wave*) üretebilir. Gerçi yaklaşık sinüs dalgası, gerçeğinin; çoğu AC yükünü sorunsuz biçimde çalıştırabilecek kadar iyi bir benzeridir. Ancak bazı duyarlı AC yükleri; örneğin bazı elektrikli fırın modelleri, elektrikli saatler, lazer yazıcılar vs., yaklaşık sinüs dalgasıyla çalışmazlar. Öte yandan yaklaşık sinüs dalgası, taşıyor göründüğü çok sayıda farklı frekans nedeniyle, TV ve radyo sinyalleriyle girişimde bulunarak, görüntüde karlanmaya veya seste statik gürültüye yol açabilir. Keza matkap veya karıştırıcı gibi değişken hızla çalışan elektrikli aletler, düzgün bir şekilde çalışmayabilir. Dolayısıyla, gerçek sinüs dalgası üreten bir çeviricinin tercihi gündeme gelebilir. Bu tür çeviriciler diğerlerinden daha pahalı olduklarından, karar bir kalite tercihi sorunudur.

Çoğu çevirici aynı zamanda, DA-AA güç çevirimi yapmadığı sırada, örneğin motor-jeneratör gibi bir AA kaynağından aldığı güçle, akü yükleyici olarak da çalışabilir. Bu sırada adeta, DA-AA çevirici olmaktan çıkıp, AA-DA çevirici olarak çalışmaya başlamıştır. Çünkü iç yapısına ek olarak inşa edilmiş akü yükleme işlevi yeteneklerine sahiptir. Çeviricideki devreler, o anki gereksinime bağlı olarak çevirme ve yükleme işlemleri arasında otomatik geçiş yapar. Bazı çeviriciler, motor-jeneratörü otomatik başlatma işlevine de sahiptirler ve ek güç gereksinimi doğduğu zaman, jeneratörü otomatik olarak çalıştırabilirler. Ancak çeviricinin şarj yeteneği yok veya yetersizse, çoğu zaman yedek bir yükleyici kullanılır. Akü yükleyicileri, örneğin motor-jeneratör gibi bir kaynaktan gelen AA elektriği, akülerin doldurulması için uygun olan DA elektriğe dönüştürür. Yükleyici/

jeneratör çifti genellikle yenilenebilir güç kaynaklarıyla ilintili olarak ve elektrik yükü talebi bu kaynakların toplam çıktısını aştığında ek güç sağlamak amacıyla kullanılır. Nitekim, şeklin sağ alt tarafında, motor-jeneratöre bağlı bir yedek yükleyici var. Çevirici yükleme modunda çalışırken, gerek varsa eğer, ona destek oluyor.

Buradaki çevirici, tam da yukarıda sözünü ettiğimiz özelliklerin tümüne sahip, becerikli bir çevirici. Normalde akım yönlendiriciden gelen DA gücü AA'ya çevirip, alttaki çıkışı üzerinden AA yükleri besler ve motor jeneratörü bu sırada çalıştırmazken, gelen güç yetersiz kaldığında, yukarısındaki hat aracılığıyla motor-jeneratörü otomatik olarak çalıştırıp devreye sokar ve bu hat üzerinden aldığı AA gücü DA'ya çevirip aküleri beslemeye yönelir. Akım yönlendiriciye gönderdiği güç, gerek varsa eğer, DA yükleri de beslemek zorunda. Çeviricinin kapasitesi her ikisine yeterli değilse, o zaman motor-jeneratöre bağlı bulunan yedek akü yükleyicisi de devreye girip, akım yönlendiricisine giden gücü takviye eder. Yedek yükleyicinin kapasitesi belirlenirken; sistemin AA ve DA gerilimlerinin, aküler için en iyi yükleme hızının ve jeneratörün çıktı kapasitesinin göz önünde bulundurulması gerekir. Ayrıca, eğer jeneratör esas olarak akü yüklemek için kullanılacaksa, yükleyicinin güç faktörü ve veriminin, jeneratörün çıktı kapasitesiyle birlikte hesaba katılması lazım.

Son olarak, şeklin alt tarafında bir 'AA transfer rölesi' var. Transfer rölesi, birden fazla AA güç kaynağı, örneğin burada olduğu gibi bir çevirici ve bir AA motor-jeneraör kullanıldığında, sisteme konması gereken bir bileşen. Bu anahtar iki kaynağın aynı anda çalışarak birbirine zarar vermesini önlüyor. Şöyle ki; çevirici DA-AA modunda çalışır ve akım yönlendiriciden gelen DA akımı, alt çıkışındaki hat üzerinden AA yüklere gönderirken, yüklerle arasındaki bağlantıyı transfer rölesi sağlar ve bu sırada da, motor-jeneratörle bağlantıyı keser. Halbuki çevirici motor-jeneratörü çalıştırıp da, kendisi yükleme moduna geçtiğinde, transfer rölesi bu sefer çeviriciyle bağlantıyı kesip, boşta kalan AA yükleri doğrudan motor-jeneratöre bağlar. Bazı çeviriciler transfer anahtarını içyapılarında içerirken, diğer bazıları içermez ve dış bir anahtara gereksinim doğar. Bunların otomotik veya elle çalışanları var.

"Peki" denilebilir: "Yenilenebilir enerji sistemi kurmanın ana hedeflerinden birisi yakıt masrafından, diğeriyse, geleneksel güç kaynaklarının yol açtığı hava ve gürültü kirliliğinden kaçınmak olduğuna göre, böyle bir sistemde motor-jeneratör ne arıyor?"...

KONUTLARDA MİKRO-HİDRO GÜÇ SİSTEMLERİ

Rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri kesintili çalışmak zorunda iken, su türbinleri sürekli bir güç kaynağı olabiliyor. Eğer yakınında, taşıdığı su miktarı yıl boyunca belli bir düzeyin altına inmeyen bir akarsu varsa, bir konutun enerji gereksiniminin hemen tamamını bu kaynaktan sağlamak mümkün. Hele 1 yerine 2 türbin kullanılıyor ise, bunları sırayla bakım onarıma alıp, üretimi hiç kesintiye uğratmaksızın. Genel olarak, 1 Mw'ın altındaki türbinelere 'mini,' konut uygulamalarında kullanılan 50 kw altındakilere de 'mikro hidro türbin' deniyor. Hidro güç aslında, halen büyük ölçeklerde ve yaygın olarak kullanıldığından, alternatif değil, yenilenebilir kaynak olarak anılıyor.

Türbinin tipini ve güç düzeyini belirleyen en önemli değişkenler, akarsuyun debisi ve suyun düşme yüksekliği. Akarsuyun saniyede taşıdığı su miktarına 'taşıma hızı' veya 'debi' deniyor. Bu su akarken, belli bir kinetik enerjiye sahip. Düşme yüksekliği ise, suyun gerçekten düştüğü bir yükseklik olmak zorunda değil. Öyle bir yükseklik ki; aynı miktar su durağan halden başlayıp bu yükseklikten düşecek olsaydı, dibe vardığında aynı kinetik enerjiye sahip olurdu. Dolayısıyla, bu suya yerleştirilen bir türbinin rotoru, düşme yüksekliğindeki hayali bir barajın üzerinden taşan suyla döndürülüyormuş gibi davranıyor. Gerektiğinde bir toplama kanalı inşa etmek suretiyle, akarsuyun tüm debisini türbine yönlendirmek mümkün. Fakat bu, maliyeti artıran bir seçenek. Konutun enerji gereksiniminden hareketle hesaplanmış olan güç düzeyine ek olarak bu iki değişken, yani debi ve düşme yüksekliği, türbinin tipini ve modelini belirliyor. Bu değişkenlerin farklı değerlerine uygun, üç farklı tipte mikro türbin var: İtki, tepki ve dalgıç tipi.

İTKİ TİPİ TÜRBİNLER

Pelton türbini itki tipi türbinler, düşme yüksekliğinin görece yüksek, 7 m veya daha fazla olduğu konumlarda iyi performans gösteriyor.

Buna karşılık küçük güçte olanları, düşük debiler gerektiriyor. Yani az miktarda suyun dik yamaçlardan aşağı aktığı konumlar için uygun. En iyi bilineni Pelton türbini...

Pelton türbini, 7 m'den başlayıp, büyükleri için 200 m'ye varan düşme yükseklikleriyle çalışıyor. İtki (*impuls*) tipi türbin olarak anılıyor. Çünkü bu tip türbinlerde suyun enerjisi önce, uygun biçimde kavislendirilmiş bir borudan geçirilip, çıkış ağzında su jeti haline getirilerek, kinetik enerjiye dönüştürülüyor. Daha sonra bu jet, çukur kap şeklindeki rotor kanatlarına püskürtülüyor. Kapların geometrisi, su jetinin enerjisini en yüksek oranda emecek biçimde tasarlanmış ve ortalarından geçen dikey bölücü plakalar, suyun iki yana doğru 'takatsizce' dağılmasını sağlıyor. Pelton türbinleri, düşey veya yatay olarak konumlandırılabiliyor. Jetlerin sayısını veya ağız yarıçapını artırmak suretiyle, tek bir rotordan sağlanan gücü artırmak mümkün. Yatay konum için genellikle iki olan jet sayısı, dikey konumlar için çoğunlukla dört veya nadiren daha fazla olabiliyor. Yatay konumlandırma halinde, tek bir alterneratörü süren aynı şaft üzerine, bir yerine iki rotor yerleştirmek de mümkün. En yüksek verim, rotor kaplarının hızı, su jetinin hızının yarısı kadar olduğunda elde ediliyor ki bu durumda, tam yükün de %60-80'i arasında çalışılıyorsa eğer; türbinden geçen suyun kaybettiği potansiyel enerjinin %90'dan fazlası mekanik işe dönüştürülebiliyor.

Jetteki suyun debisi, boru ağzının içinde kayan bir 'mızrak' tarafından kontrol ediliyor. Hareketleri yağ basıncıyla çalışan bir servomotor tarafından otomatik olarak yönetilen mızrak, ağız çıkışını kısmen veya tamamen kapatabiliyor. Böylelikle su jetinin hızını; değişen yük talepleri, su yükseklikleri ve debileri için yaklaşık sabit tutmak mümkün olabildiğinden, rotor çok farklı ağız açıklıklarında dahi aynı hızla dönebiliyor. Bu yüzden, iyi tasarımlanmış bir Pelton türbininin verimlilik eğrisi düz, fakat diğer tiplerinkine oranla daha düşük oluyor.

Jetten çıkan suyun miktarını, yük talebindeki bir düşüşe paralel olarak hemen azaltmak, boru uzunsa eğer, basıncında büyük bir yükselme olacağından mümkün olamıyor. Öte yandan aynı debiyi püskürtmeye devam, motorun fazla hızlı dönmesi anlamına geleceğinden, böyle durumlarda fazla su ya basınç rahatlatıcı bir vana aracılığıyla saptırılıyor, ya da jetin önüne, ek bir kontrol aracı olarak saptırıcı (deflektör) giriyor. Saptırıcı, mızrak devreye girip de debiyi azaltana kadar, jetin kinetik enerjisini kısmen dağıtıyor.

TEPKİ TİPİ TÜRBİNLER

Tepki tipi türbinler, itki tipi olanlara oranla çok daha fazla miktarda su hacmi gerektiriyor. Fakat buna karşılık, 1 m'ye inen düşme yüksekliklerinde dahi çalışabiliyor. Dolayısıyla genelde, görece düz bir arazide yüksek debiyle akan akarsular için en uygun tercihi oluşturuyorlar. En iyi bilineni Kaplan türbini...

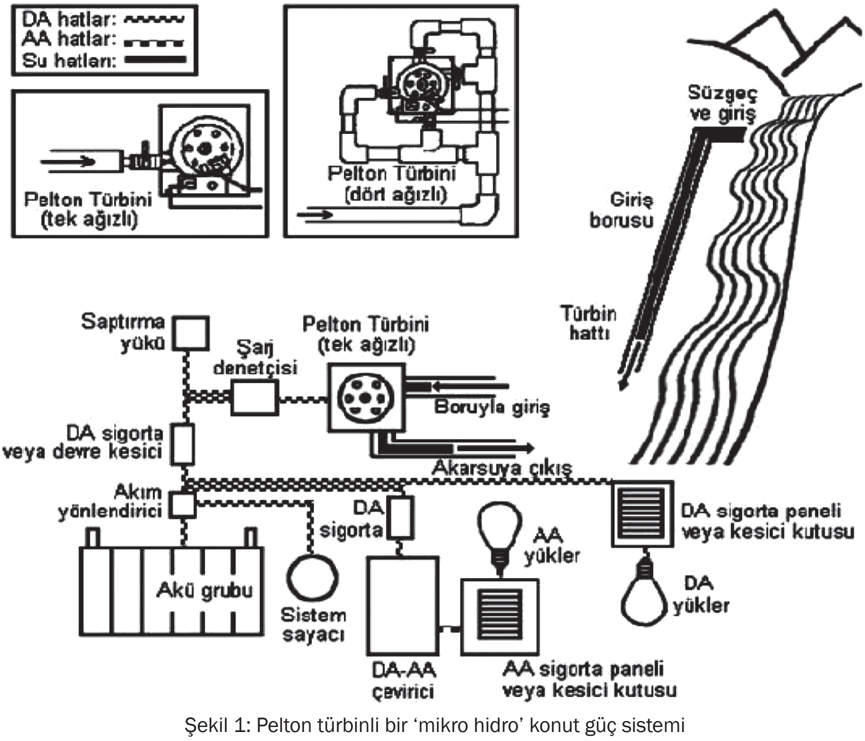
Kaplan türbini, düşük düşme yüksekliği ve fakat yüksek debiler için en uygun türbin tipi. 2 ila 80 metre düşme yükseklikleri arasında verimli olabiliyor. Döner kısmını oluşturan rotoru, bir geminin uskur geometrisine sahip ve genellikle, alternatör şartıyla birlikte dikey olarak yerleştiriliyor. Ancak, yatay konumlandırıldığı durumlar da var. Uskurdaki kanat sayısı 3 ila 8 arasında değişiyor ve rotor çapı en büyük ünitelerde 10 metreye ulaşabiliyor.

Akış, şaft ekseni boyunca. Tepki tipi türbin olarak biliniyor. Çünkü dönmesini, Pelton türbininde olduğu gibi su jetlerinin sağladığı itme kuvvetinden değil, suyun rotor çıkışında ivmelenmesi sonucu oluşan tepki kuvvetiyle başarıyor. Tıpkı döner bahçe sulayıcılarında, borudan yüksek basınçla gelen suyun, sulayıcının kavisli kollarına düşük hızla girip, atmosferin görece düşük basıncıyla karşılaştığında ivmelenerek dışarı çıkması sonucu oluşan tepki kuvvetinin sulayıcıyı döndürmesi gibi.

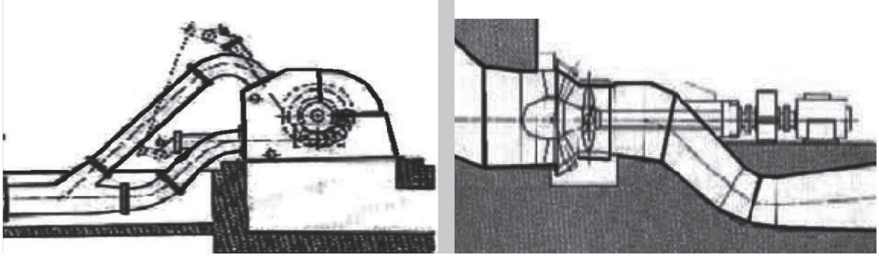
Düşen suyun miktarında veya düşüş yüksekliğinde veya yük talebinde kayda değer değişiklikler yer aldığı takdirde, uskur geometrisine sahip türbinlerin verimi %75'in altına düşüyor. Debi fazlalığına karşı önlem, görece kolay. Genellikle; ya giriş vanalarının 'yük talebini izleyen otomatik kontrolü'yle sağlanıyor, ya da fazla su, yakın konumda inşa edilmiş bulunan baca şeklindeki bir depoya (*penstock*) saptırılıyor. Gerektiğinde bu baca suyu, 'yüksüz başlatma' için kullanılabiliyor. Düşüş yüksekliğindeki mevsimsel değişmelerin veya yük talebindeki oynamaların yol açtığı verim düşüklüğü sorunlarını aşmak için ise, Kaplan türbininde, rotor kanatlarının açıları ayarlanabilir kılınmış. Bu, yağ basıncıyla çalışan ve genellikle rotor gövdesi içine yerleştirilmiş bulunan bir servo-motor aracılığıyla başarılıyor. Yağ, türbin ve alternatör şaftı üzerindeki yarıklardan geçen borularla iletiliyor. O anki su akışına göre en uygun kanat açısı ayarı, keza bir pilot servomotor tarafından yapılıyor. Türbin-alternatörün bu nitelikleriyle, suyun düşme yüksekliğindeki mevsimsel oynamalar sorun olmaktan çıkıyor. Hatırlanacak olursa, Pelton türbininde de benzer bir denetim, jetteki suyun debisini yöneten bir mızrak tarafından yapılıyordu. Böyle, güç düzeyi görece yüksek sistemlerde, hız ayarı önemli ve bu konuya daha sonra tekrar döneceğiz.

Şekil 1'de konut uygulamasına yönelik, Pelton türbinli bir 'mikro hidro' güç sistemi görülüyor. Su türbinleri de rüzgar türbinleri gibi aktif üreticiler olduklarından, devrede bir saptırma yükü var.

İtki tipi türbinlerin hemen hepsi, tepki tipi olanların ise bazıları, potansiyel gücü artırmak açısından, suyun türbin yuvasına kapalı bir kanalla, örneğin bir boru hattıyla yönlendirilmesini gerektiriyor. Tepki tipi türbinlerden bazılarında bu, yükseltilmiş üstü açık bir kanalla da yapılabiliyor. Tek jetli küçük bir itki tipi türbin için, 5 cm çapında bir boru yeterli olurken; 4 jetli daha büyük bir türbin, 10 cm yarıçap gerektiriyor. Fazla küçük boru çapı, aşırı sürtünmeye yol açarak, boruda enerji kaybına neden oluyor. Pelton türbini aldığı suyu kullandıktan sonra, bir çıkış borusuyla akarsuya geri veriyor. Böylelikle akarsuyun debisinde değişme olmuyor. Bu çıkış borusu PVC olabiliyor. Soğuk iklimlerde, giriş ve çıkış hatlarının, donma olasılığına karşı yalıtılması, hatta toprak altına gömülmesi lazım. Şekil


DA hatlar:
AA hatlar:
Su hatları:
Pelton Türbini (tek ağızlı)
Pelton Türbini (dört ağızlı)
Süzgeç ve giriş
Giriş borusu
Türbin hattı
Saptırma yükü
Şarj denetçisi
Pelton Türbini (tek ağızlı)
Boruyla giriş
DA sigorta veya devre kesici
Akarsuya çıkış
Akım yönlendirici
DA sigorta
AA yükler
DA sigorta paneli veya kesici kutusu
DA yükler
Akü grubu
Sistem sayacı
DA-AA çevirici
AA sigorta paneli veya kesici kutusu

Şekil 1: Pelton türbinli bir 'mikro hidro' konut güç sistemi

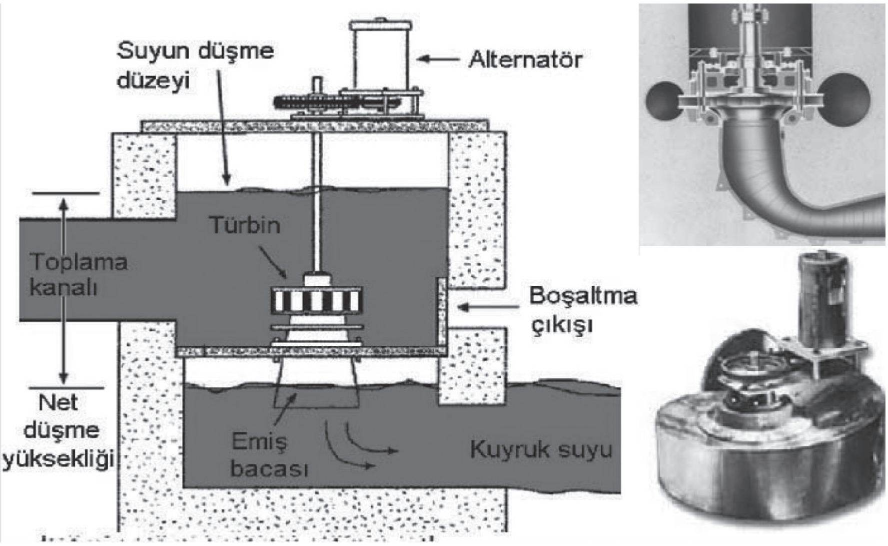


Şekil 2: Pelton ve Kaplan türbinlerinin kaba şemaları, raslantı olarak ikisi de yatay konumlandırılmış.

2'de, Pelton ve Kaplan türbinleri için birer bağlantı şeması veriliyor. Su debisinin yüksek olduğu yerlerde, aynı veya değişik tip birden fazla türbin yerleştirilerek büyük güçlü sistemler kurulabilir.

Francis türbini, tepki tipi türbinlerden en yaygın kullanılanıdır. Sarmal kabuklu tasarımıyla, geniş bir güç yelpazesine sahip. 3-600 m arasında düşme yükseklikleriyle çalışabiliyor ve dirsek şeklindeki çıkış borusu, alttan emişe yol açarak verimi artırıyor.

Şekil 3'te bir modelinin yerleştirme şeması ve resmi görülüyor. 25 cm çaplı rotoruyla bu model, 1-3 m düşme yüksekliği aralığında, debiye bağlı olarak 550-2.200 w arası güç sağlıyor.


Suyun düşme düzeyi
Alternatör
Türbin
Toplama kanalı
Boşaltma çıkışı
Net düşme yüksekliği
Emiş bacası
Kuyruk suyu

Şekil 3: Francis türbini

DALGIÇ TİPİ PERVANELİ TÜRBİNLER

Bu tip türbinlerin verimi, diğerlerinden daha düşük. Fakat tasarımları basit. Türbinin önündeki bir uskur, gövde içindeki bir alternatöre bağlı. Hızlı akan bir suya daldırıldığında uskur, suyun uyguladığı kuvvetle dönüyor. Dolayısıyla bu türbinler hızlı akan, görece derin akarsularda ve suyun saptırılıp biriktirileceği 'toplayıcı kanalların yapılamadığı konumlarda iyi sonuç veriyor.

Su türbinlerinin çıkış voltajı, değişik gereksinimlere yanıt verebilmek üzere farklı olabiliyor. Örneğin deniz uygulamalarında, çoğu tekne 12 V'luk sisteme sahip. Dolayısıyla, orta büyüklükteki sistemler için en yaygın değer 12 V iken, büyükleri 24 veya 48 V çıkışlı tasarımlanmış.

Su türbinleri de rüzgâr türbinleri gibi aktif güç üreticisi olduklarından, rotor döndükçe üretilen gücün, bir veya diğer şekilde kullanılması gerekiyor. Dolayısıyla rüzgar türbinlerinde olduğu gibi, alternatör bir saptırma yüküne bağlı ve bu yük; ya basit bir ısıtıcı direnç, ya da elektrikle çalışan bir alet oluyor. Isıtıcı direnç soğuk iklimlerde donmayı önlemek amacıyla, türbin gövdesini veya giriş suyunu ısıtmakta kullanılabilir. Çoğu sistemde güç dağıtım işini, 'yük saptırıcı bir şarj denetçisi' yapıyor. Bu denetçi; bir yandan konuttaki elektrikli aletlerin talep ettiği gücü sağlar ve diğer yandan aküleri şarj ederken, aküler dolduğunda fazlalık gücü saptırma yüküne yönlendirerek, alternatörü olası zararlardan koruyor. Bazı denetçiler saptırma işini, gerilime duyarlı basit bir anahtarla yapıyor. Türbinle akü grubu arasına yerleştirilen bu tür denetçiler, akülerdeki gerilim düzeyine göre, iki şıktan birini icra ediyor ve alternatör çıkışındaki gücün tamamını; ya akülerin gerilimi üst sınıra ulaştığında saptırma yüküne, ya da gerilim alt sınırın altına indiğinde tekrar akülere yönlendiriyor ta ki aküler dolana kadar...

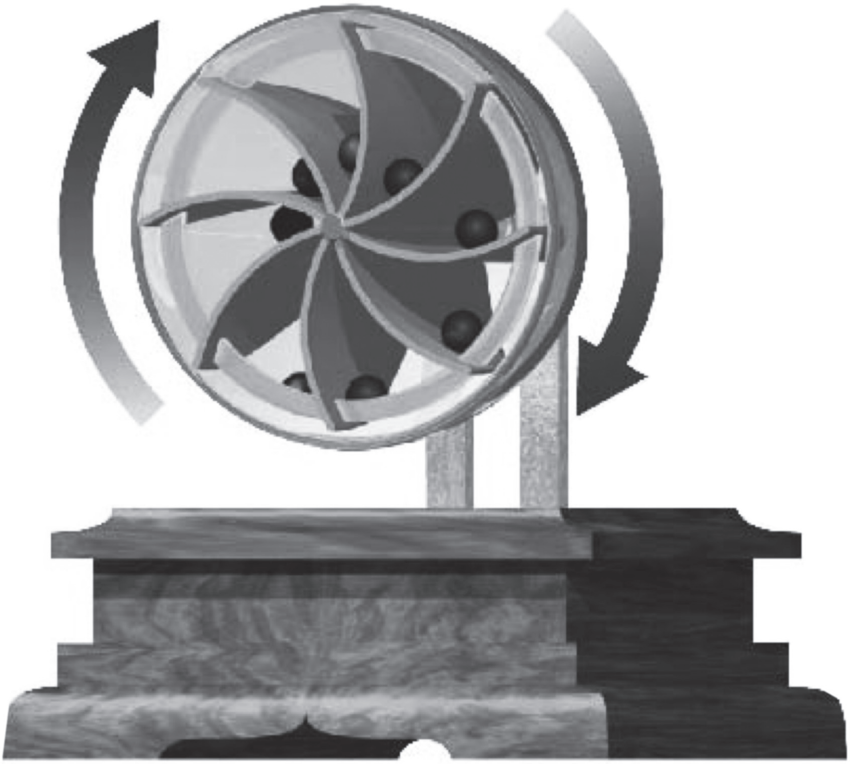
'Oranlı denetçiler' olarak nitelendirilen bazı diğerleri ise, akülerle türbin veya akülerle saptırma yükü arasına yerleştiriliyor. Bu denetçiler; dolmakta olan aküler ve konuttaki talep üretilen gücün tamamını kullanamıyorsa eğer, sadece fazlalık gücü saptırma yüküne yönlendiriyor. Su türbinlerinin hemen hepsinde denetçiler, türbin ünitesinin dışında, ayrı bir eleman olarak bulunuyor. Böyle bir 'yük saptırıcı ve şarj denetçi'nin türbinle akü grubu arasına yerleştirilmesinden sonra, konutun elektrik sistemi artık akülere bağlanabilir hale geliyor. Bakalım hız ayarına...

DEVR-İ DAİM MAKİNELERİ NEDEN ÇALIŞMAZ?

Newton yasaları bir cismin, relativistik olmayan tuzlardaki davranışını betimler. Birinci yasa; üzerindeki net kuvvet sıfır olan bir cismin sabit hızla hareket ettiğini, ikincisi; üzerinde F kuvveti bulunan bir cismin F=ma ilişkisine göre ivmelendiğini, üçüncüsüyse; iki cisimden birincisinin diğerine F_{12} kuvveti uyguluyor olması halinde, ikincisinin de birincisine, ters yönde ve eşit büyüklükte bir F_{12}=-F_{12} kuvveti uyguladığını söyler. Bu üçüncü yasanın, "etki eşittir tepki" şeklinde dile getirildiği de olur.

Termodinamik yasalarıysa, çok sayıda parçacıktan oluşan sistemlerin 'istatiksel' ortalama davranışlarıyla ilgilidir. 'Sıfırıncı' denilen yasa, çok basit olarak; A, B, C gibi üç cisimden, A'nın B, B'nin de C ile aynı sıcaklıkta olması halinde, A'nın C ile aynı sıcaklıkta (termodinamik dengede) olması gerektiğini, yani termodinamik denge durumunun 'geçişme özelliği'ne sahip olduğunu söyler. Birinci yasa, farklı şekillerde dile getirilebilmekle beraber, yalıtılmış bir sistemdeki toplam enerjinin korunumu ilkesine eşdeğerdir. İkinci yasaysa, yalıtılmış sistemlerde; düzensizliğin bir ölçüsü olan entropinin zamanla azalmayacağını, kendiliğinden yer alan süreçlerde artıp diğerlerinde aynı kaldığını, fakat mikroskopik sistemlerde entropi sapmalarının olabildiğini belirtir. Bir de üçüncü yasa vardır ki bu; sıcaklık mutlak sıfıra yaklaştığında, sistem entropisi sabit bir değere ulaşırken tüm süreçlerin durduğunu, dolayısıyla bir cismi mutlak sıfıra kadar soğutmanın sınırsız zor olduğunu söyler.

İnsanın doğa hakkında türettiği tüm diğer yasalar gibi bu yasalar da; kuramsal olarak ispatlanmış 'teorem'ler olmayıp, gözlemlerin ardından 'geri bakış'la türetilmişlerdir. Gerçi geçerlilikleri doğrultusunda, üç asırdan fazladır uygulanmakta olmaları sayesinde o kadar çok kanıt birikmiştir ki; bugün var olan teknolojik medeniyetimizin hemen tamamının, bu yasaların geçerliliği üzerine inşa edilmiş olduğu söylenebilir. Fakat yine de, yeni bazı koşullar altında geçerli olmamaları olasılığı hâlâ vardır. Nitekim, geçen yüzyılın başlarında Newton yasalarının, ışık hızına yakın hızlarda geçerli olmadıkları fark edilmiş ve Einstein'ın görelilik kuramı doğrultusunda değiştirilerek,



Şekil 1

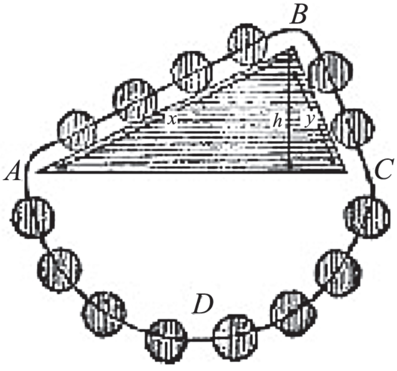
bu yüksek hızlarda da geçerli olan bugünkü hallerine getirilmeleri gerekmiştir. Bu gelişmeye paralel olarak; termodinamiğin birinci yasasını oluşturan enerjinin korunumu ilkesi, kütlenin enerjiye eşdeğerliğini de ($\Delta E=\Delta mc^2$) kapsayacak biçimde genişletilmiştir.

Termodinamik yasaları, Newton yasalarının zorunlu birer sonucu değildir. Bu nedenle olsa gerek, pek seyrek olmayarak; bu yasaların etrafından dolanılarak, sundukları kısıtların aşılabileceği yanılgısına düşüldüğü olur. Sürtünme kayıpları da gözardı edilince, sonuç bir ‘devr-i daim makinesi’dir. Halbuki bilim insanları termodinamik yasalarını; gaz, sıvı veya katı; büyük ölçekli makroskopik sistemlerin analizinde sık sık kullanırlar. Bunu yaparken; aslında bir yandan da yasaları, bir bakıma sınava tabi tutmakta olup, bunun farkındadırlar. Hatta bazen kendileri, yasalara aykırı görünen tasarım önerileri üretip, aralarında tartışır ve tasarım hatasının belirlenmesi sırasında, gözden kaçan fizik ilkelerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaya çalışırlar. Bunun dışında, geçmişteki uygulamalarının istisnasız biçimde, deney ve gözlemlerle uyumlu sonuçlar vermiş olmasından dolayı, yasalara karşı güven dolu bir gönül rahatlığı içerisindedirler.

Dolayısıyla, yasalara uymayan bir tasarımla karşılaştıklarında, tasarımı ellerinin tersiyle kenara itip, ayrıntılarına girmeye gerek görmeksizin reddederler. Bu yazıdaki amacımız, bu türden birkaç tasarımı ele alıp; neden geçersiz olduklarını, savunuldukları biçimde neden çalışamayacaklarını açıklamaya çalışmak. Bazıları Newton yasalarının henüz bilinmediği ya da henüz yeterince iyi anlaşılmadığı dönemlerdeki hatalı analizlerin ürünü olup, bazıları da uzmanlar tarafından hazırlanmış şaşırtıcı örnekler niteliğindedir. Önce yanıltıcı biçimleriyle sunulup, ardından hataları ayıklanacak. Hepsinin de, bulanık kalmış bazı noktaları berraklaştıran eğitici yanları var.

YERÇEKİMİ KUVVETİNE DAYALI TASARIMLAR

Hollandalı matematikçi ve mühendis Simon Stevin (1548-1620) mekanik ilkeleri üzerinde çalışmış ve çok sayıda devr-i daim makinesi tasarımını incelemiştir. En fazla ilgisini çekmiş olan Şekil 2'deki tasarımda; bir zincire eşit aralıklarla (d) dizilmiş olan eşit ağırlıklar (m), üçgen kesitli sürtünmesiz bir rampanın etrafından dolanıyor. Eğimi daha dik olan rampadaki kütlelere etki eden yerçekimi kuvvetinin daha büyük olacağı düşüncesiyle, zincirin saat yönünde dönmesi bekleniyor. Kazandığı kinetik enerji yararlı işe dönüştürülebilirse, zincir tekrar dönmeye başlayacak ve sistem, sürekli enerji üreten bir devr-i daim makinesi oluşturacaktır. Zamanında epeyce tartışılmış olan bu tasarımdaki hatayı, Newton'un ikinci yasasını kullanarak göstermek mümkün. Çünkü, x rampasındaki kütlelerin ağırlığının (mgx/d) rampaya paralel olan bileşeni (mgx/d)sinA, diğer rampadakilerinki de (mgy/d)sinC'dir. Halbuki öte yandan, sinA=h/x ve sinC=h/y olduğundan, bu bileşenlerin ikisi de mgh/d'ye, dolayısıyla birbirine eşit olur. Başlangıçta eğer durağansa, zincirin harekete geçmesi mümkün değildir. Yok, eğer başlangıçta bir itkiyle harekete geçirilmişse; sürtünmenin gözardı edilmiş olması nedeniyle, hareketine sabit hızla de-



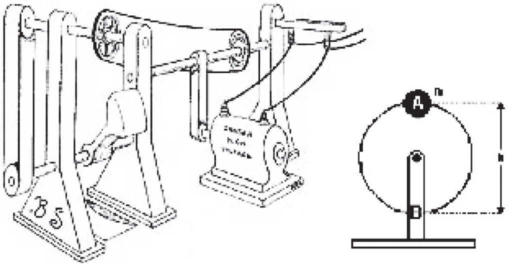
Şekil 2

vam eder. Ancak sistemden enerji alınmaya kalkışıldığında, kinetik enerjisi azalır ve tükendiğinde durur.

Stevin bu problemi, Newton yasalarının bilinmediği bir dönemde irdelerken, 'sanal iş' (*virtual work*) ilkesini keşfetmiştir. İlkeyi şöyle açıklamak mümkün: Herhangi bir sistemi ele alıp, dışarıdan üzerine uygulanan tüm kuvvetlere ve dönme momentlerine bakalım. Sonra da sistemin, olası bir hareket biçimi çerçevesinde, az biraz, 'diferansiyel' bir miktarda hareket ettiğini veya döndüğünü varsayalım. Eğer bu 'sanal' hareketi sırasında, sistemin üzerindeki kuvvetlerin veya dönme momentlerinin yaptığı işlerin toplamı sıfırsa, sistem bu hareketinden dolayı enerji kazanamaz. Sonuç olarak bu hareketi de yapmaz: Niye yapsın ki? Eğer sanal iş miktarı negatifse, sistemin hareket etmesi için, tam tersine, dışarıdan üzerine iş yapılması gerekir. Dolayısıyla; sistemin harekete geçmesi için, sanal iş miktarının pozitif olması gerekir ki sistem, hareketi için gerekli olan, hareketinin temsil ettiği kinetik enerjiyi kazanabilsin. İlke, döngüsel hareket tasarımları için, bir periyot üzerinden kullanılmak durumundadır.

Dikkatli incelemeleriyle, statik sistemlerin kararlılık analizinde bugün dahi hâlâ sıkça kullanılan sanal iş ilkesini aydınlanma çağı öncesinin alacakaranlığında keşfetmiş olan Stevin'in anısına, yukarıdaki şekil mezar taşına kazınmıştır.

Şekil 3'te bir 'kütleçekimi makinesi' çizimi görülüyor. Burada, dönme eksenine göre kaymış konumdaki bir kütle, başlangıçta, diyelim en üst noktada bulunuyor. Bize göre hafifçe sağdaki bir A noktasına kaydırılması halinde, yerçekiminin etkisiyle saat yönünde dönmeye başlayacaktır. B noktasına kadar kuvvet hep dikey olduğundan, bu kuvvetin her an için, kütlenin hareketi yönünde bir bileşeni vardır ve bu bileşen kütle üzerinde, 'kuvvet çarpı yol' kadar pozitif iş yapar. Dolayısıyla kütle, en alt B noktasına inene kadar kinetik enerji kazanacaktır. Kazandığı kinetik enerji, 'düşer'ken kaybettiği kütleçekimsel potansiyel enerji, yani mgh kadardır. Kütle bu kinetik enerjiyle başlayarak, dairenin sol yarısında da dönmesine devam eder. Fakat bu yarıda, yine aşağıya doğru olan kuvvetin hareket doğrultusundaki bileşeni bu sefer hareke-

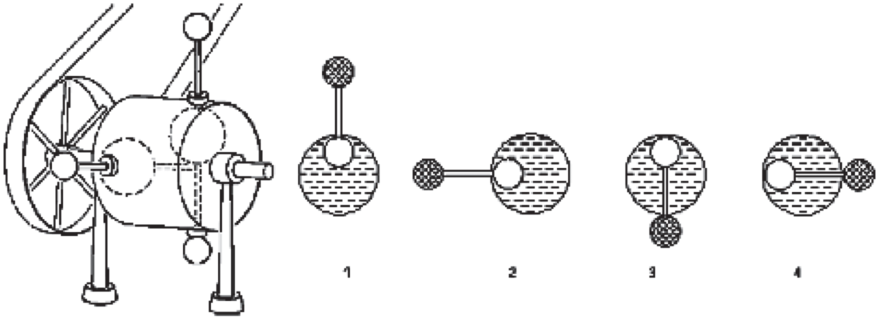


Şekil 3

te ters yönde olduğundan, kütle üzerinde yapılan iş negatiftir. Kütle artık yavaşlamaktadır ve sürtünme kayıplarının olmadığı varsayılırsa, tekrar A noktasına geldiğinde durur. Çünkü, B noktasına göre yüksekliği tekrar h kadar artmış ve B noktasındayken sahip olduğu mgh kadarlık kinetik enerji, aynı miktarda potansiyel enerjiye dönüşmüştür. Kütle bu sefer de saatin tersi yönde dönme eğilimine girer ve buraya kadar izlemiş olduğu patikayı tersinden izler. Tıpkı bir sarkaç gibi, sağa sola salınıp duracak ve bu periyodik hareketini, sürtünme kaybı yokluğunda sürdürecektir. Başlangıçta itilerek, diyelim saat yönünde bir dönme kinetik enerjisinin verilmesi halindeyse, kütle; düşerken daha da hızlanıp, yükselirken yavaşlayacak ve tur üzerinden ortalama kinetik enerjisi aynı kalmak kaydıyla, hep aynı yönde dönüp duracaktır. Bu tasarım belli ki; enerjiyi koruyan, gerçek bir 'devr-i daim makinesi' oluşturmakta ve net enerji üretmesi olanaksız. Fakat, ünlü İngiliz fizikçisi Paul A. M. Dirac'ın 1930'lu yıllarda, evrensel sabitlerin evrenin yaşına bağlı olarak zamanla değişebileceği ve bu arada kütleçekimi sabiti g'nin azalmakta olduğu, hatta 10 milyar yıl sonra şimdikinin yarı değerine sahip olacağı yönündeki kuramsal spekülatif düşünceleri, bu tasarımdan net enerji üretilebileceğine dair akıl jimnastiklerine yol açtı. Gerçekten de, eğer g sabiti zamanla azalıyorsa, bu kütle ne yapar?

Kütlenin başlangıçta yine, en üst noktanın hemen sağındaki A noktasında bulunduğunu ve t=0 anında, sıfır hızla serbest bırakıldığını varsayalım. Bir önceki, yani g'nin sabit olduğu durumdaki gibi; B noktasına inene kadar hızlanacak, fakat g artık zamanla azalmakta olduğundan, B noktasına vardığında, önceki duruma göre daha az kinetik enerji kazanmış olacaktır. Sol yarıdan yukarı çıkarken ise, sürekli yavaşlar. Fakat A noktasına varana kadarki kinetik enerji kaybı; g sabiti kütle sağ yarıdayken azalmış bulunduğundan ve hâlâ da azalmakta olduğundan, B noktasındaki kinetik enerji miktarından daha azdır. Kütle sonuç olarak, A noktasını bir miktar kinetik enerjiyle aşar. Tam o sırada bu kinetik enerjisi alınıp kullanılacak olsa, kütle yine sıfır başlangıç hızıyla düşmeye başlayacak ve tekrar A noktasına döndüğünde, bir miktar kinetik enerji daha kazanmış olacaktır. Bu da alınabilir ve kütle, hareketine devam eder. Burada, kesintili olarak da olsa, sınırsız enerji üretebilecek bir sistem var gibidir. Çünkü, kütlenin hareketinin her döngüsünde bir miktar enerji elde ediliyor ve hareket, g sabitinin devamlı azalıp sonsuz sürede sıfırlandığı varsayımıyla, sonsuza kadar devam edebiliyor.

Burada, kütlenin daire etrafında turlar atıp duracağı ve her tu-



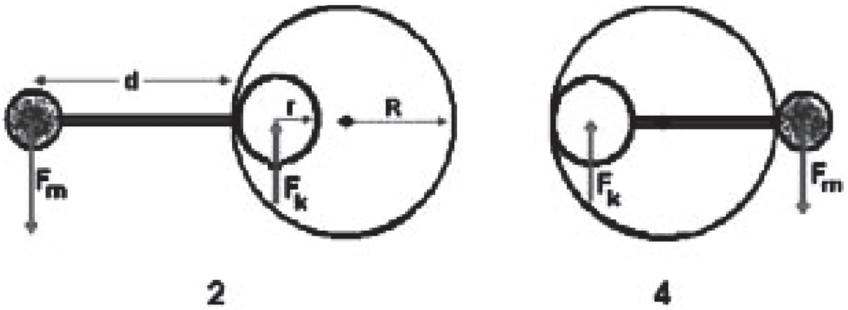
Şekil 4

run sonunda kütleden bir miktar enerji alınabileceği doğru. Analizdeki hata, Grek düşünürü Zeno'nun adıyla bilinen ikilemde olduğu gibi; sonsuz sayıda pozitif terimden oluşan her toplamın sonsuza gittiği yanılgısında yatıyor. Halbuki, böyle bir toplamın sonucu öyle olmak zorunda değil. Nitekim, bu tasarımın kurgusuna bakarken, g'nin zamanla azalma hızının sabit olduğunu varsayalım. Şöyle ki; birinci turda g'nin, kütle A'dan B'ye inene ve B'den tekrar A'ya çıkana kadarki 'yol ağırlıklı ortalama' değerleri arasındaki fark Δg_1 olsun: İkinci turdaki Δg_2, üçüncü turdaki Δg_3 vb... Bu durumda, kütlenin i'nci turda A'dan B'ye inerken kazandığı kinetik enerjiyle, B'den A'ya çıkarken kaybettiği kinetik enerji arasındaki fark, $m\Delta g_i h$ kadar olacaktır. Dolayısıyla, turun sonunda A noktasına ulaştığında sahip olduğu kinetik enerji, turun başlangıcındakinden $m\Delta g_i h$ kadar daha fazladır. Ancak, tur sonlarındaki bu kinetik enerji artışları, g'deki azalmaların toplamı g'yi bulana, yani $\Sigma(\Delta g_i)=g$ olana kadar devam eder. Dolayısıyla; sistemden alınabilecek toplam enerji miktarı, $m\Delta g_i h$'lerin toplamı, yani $\Sigma m(\Delta g_i)h=mgh$ kadar olur. Bu da, kütlenin başlangıçta, B noktasına göre sahip olduğu potansiyel enerjiye eşittir. Δg_1'ları istediğimiz kadar küçülterek, döngü sayısını istediğimiz kadar artırabiliriz, bu doğru. Fakat sonuç değişmez.

Şekil 4'te görülen, 18. yüzyılın ortalarından kalma bir tasarım. Su dolu silindir şeklindeki bir tankın içinde, içi boş küreler var. Kürelerin her biri, birer kolla, tankın dışındaki birer kütleye bağlı. Tasarım sağ üstteki şekilde gösterildiği gibi; tek bir kol ve kolun iki ucuna bağlanmış bir kütle ile içi boş bir küre çiftine indirgenebilir. Kürenin hacmi ve kütle öyle seçilmiş ki; kol dikey durumda ve kütle üstte, yani düzenek 1. konumdayken, suyun küre üzerindeki kaldırma kuvveti, kütleyi ancak kaldırabilecek kadar. Durum buyken, kütleye sola doğru hafif bir itme uygulandığında; kütle saatin tersi yönde ‘düşme’ye başlayacak ve izleyen turun ikinci yarısında da, sağdan yukarıya doğru yükselecektir. Dolayısıyla sistem, turun ilk yarısında kinetik enerji kazanır, ikinci yarıdaysa yavaşlar. Dikkat edilecek olursa, kaldırma kuvvetinin seçilmiş olan büyüklüğü nedeniyle, kol; ilk 90 derecelik dönme sırasında, tümüyle dışarıda kalmak zorundadır. İkinci 90 derecelik dönmenin başında içeriye girmeye başlar ve sonunda tümüyle içeri girmiş olur. Üçüncü çeyrek sırasında, keza kaldırma kuvvetinin büyüklüğü nedeniyle, tümüyle içeride kalmak zorundadır. Son çeyrek sırasında dışarı çıkmaya başlar ve sonunda, 1 numaralı konuma döner. Önemli olan şu ki kol birinci çeyrekte tümüyle dışarıda, üçüncü çeyrekte tümüyle içeridedir. İkinci ve dördüncü çeyreklerdeyse kolun konumu, birbirinin tersi seyirler izler: İkinci çeyreğin başında tümüyle dışarıda ve sonunda tümüyle içerideyken, dördüncü çeyreğin başında tümüyle içeride ve sonunda tümüyle dışarıdadır. Uzun sözün kısası; kütlenin ağırlığının ilk çeyrekteki moment kolu, üçüncü çeyrektekinden daha uzundur ve dolayısıyla, tankın üzerinde uyguladığı dönme momenti daha büyük olur. Sistem ilk çeyrekte, üçüncü çeyrekte kaybedeceğinden daha fazla dönme kinetik enerjisi kazanır. Diğer iki çeyrekteki kazanç ve kayıp birbirini götüreceğinden, açısal ivmelenerek hızlanır. Öyle mi?

Sürtünmesiz hareket ve sızdırmazlık güvencesi verilse bile, bu sistem iddia edildiği gibi çalışmaz. Çünkü, birinci çeyrekte üçüncü çeyreğe göre; ağırlığın moment kolunun daha uzun olduğu doğru, fakat tanka uygulanan toplam dönme momentinin daha büyük olduğu varsayımı yanlıştır. Yapılan analizde dikkatler, dışarıdaki kütle üzerinde toplanırken, içerideki küre gözden kaçırılmış. Halbuki kütlenin yanında kürenin de, sistem üzerindeki dönme momentine katkısı vardır ve değişik konumlarda, bu iki etken birbirini dengeler.

Bunu görebilmek için Şekil 5’te şekildeki, ikinci ve dördüncü konumlara bakalım. Kütle m, kürenin hacmi V olsun. Kütlenin ağırlık merkezinin tank yüzeyine olan uzaklığına d diyelim; kürenin yarıçapına r, tankınkine de R. Kütle üzerindeki yerçekimi kuvveti mg büyüklüğünde olup, aşağıya doğrudur. Suyun küre üzerindeki kaldırma kuvvetiyse, kürenin hacmi kadar suyun ağırlığına eşit, yani $\rho_s Vg$ olup, yukarıya doğrudur. Dolayısıyla, bu iki kuvvetin tanka uyguladıkları dönme momentleri, ikinci konumda zıt, dördüncü konumdaysa aynı yöndedirler. Örneğin ikinci konumda m kütlesi ile kürenin tank üzerinde, tankın merkezi etrafında ve saatin tersi yönde uyguladıkları dönme momentlerinin toplam büyüklüğü; $M_1=F_m(d+R)-F_k(R-r)=mg(d+R)-\rho_s Vg(R-r)$ olur. İkincisindeyse bu toplam saat yönünde

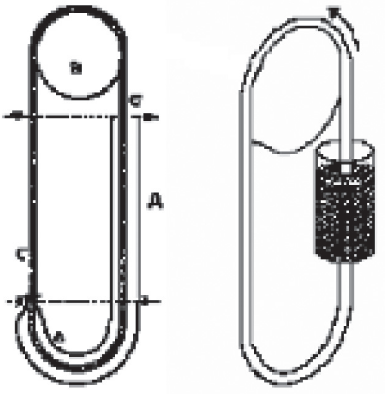


Şekil 5

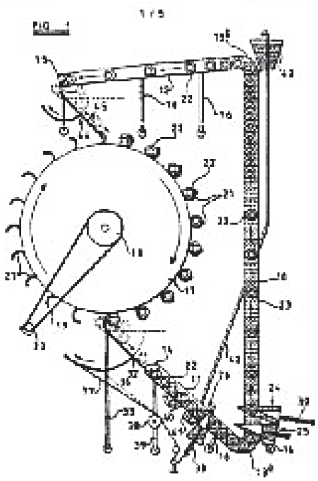
olup, büyüklüğü; $M_2=F_m(d+2r-R)+F_k(R-r)= mg(d+2r-R)+ \rho_s Vg(R-r)$'dir. $M_1>M_2$ olması için; $mg(d+R)-\rho_s Vg\ (R-r)>mg(d+2r-R)+\rho_s Vg(R-r)$, yani $mgR-\rho_s Vg(R-r) >mg(2r-R)+\rho_s Vg(R-r)$ ya da $mg2(R-r)>2\rho_s Vg(R-r)$ olması gerekir. Bu da, $mg>\rho_s Vg$ olmasını gerektirir. Halbuki bu sonuç, başlangıçta yapılmış olan; suyun küre üzerindeki kaldırma kuvvetinin m kütlesini kaldırmaya yeterli olduğu varsayımıyla ($\rho_s Vg>mg$) çelişir.

Suyun kaldırma kuvvetinden esinlenmiş, çok daha basit motor tasarımları da var. Bunlardan, 1906 yılında adı bilinmeyen bir tasarımcı tarafından ortaya atılan fikir, Şekil 6'da görülüyor. İyice yağlanmış bir pamuk ipliği, yukarıda bir makaranın etrafından dolanıyor ve J şeklindeki, içi su dolu bir tüpten geçiyor. Tüpün iki ucu da açık olmakla beraber, soldakinin ağzı daraltılmış ve ip bu ağızdan, sürtünmesizce ve sızıntıya yol açmaksızın geçebiliyor. İddia şu: İpin suyun içinden geçen kısmının sağ taraftaki fazlalılığı, ki bu A uzunluğu olarak gösterilmiş, suyun kaldırma kuvvetine tabi. Halbuki A uzunluğunun sol taraftaki karşılığı, böyle bir kaldırma kuvvetinden yoksun ve sadece yerçekiminin etkisi altında. Dolayısıyla, ip sağ tarafta yukarı doğru kaldırılırken, sol tarafta aşağıya doğru çekilir ve makara döner. Makaranın kazandığı dönme kinetik enerjisi, eksenine bağlı bir jeneratörde elektriğe dönüştürülse bile, makara tekrar dönmeye başlayacaktır, vs.

Bu analizdeki hata, suyun bu ip üzerinde kaldırma kuvveti uygulayabildiği varsayımıdır. Halbuki bu tasarım, aynı şekilde sağda görülenle



Şekil 6

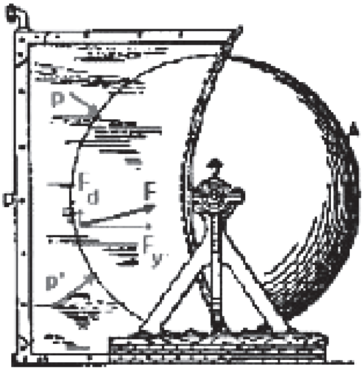


Şekil 7

eşdeğerdir ve kabın içine, örneğin cıva gibi çok daha yoğun bir sıvı konsa bile, ip üzerinde kaldırma kuvveti uygulayamaz. Çünkü, ipin sıvı içinden geçen kısmı, sıvıya 'batmış' değildir ve Arşimed ilkesi, burada kullanılamaz. Bir başka anlatımla, silindir şeklindeki ipin dış yan yüzeyine sıvı tarafından uygulanan basınç, hep bu yüzeye dik, yani yatay düzlem üzerindedir. Oluşan yatay kuvvetler birbirini götürür. Silindirin alt (ve üst) yüzeyindeyse, sıvı yoktur. Dolayısıyla da, herhangi bir dikey bileşen, yani kaldırma kuvveti oluşamaz.

Tabii, bir devr-i daim makinesi keşfetmiş olduğu iddiasında bulunanların tasarımları, her ne kadar ilke temelinde böyle olsalar da, bu kadar basit olmuyorlar. Tasarımcı genellikle, sistemdeki zayıf bir noktayı belirlediğinde, bunu ortadan kaldırmak için yeni unsurlar ekliyor. Bunların doğurduğu sakıncaları tamir için de, daha yenilerini... Tasarım sonuç olarak, çalışma düzenindeki hataların kolayca görülemeyeceği karmakarışık bir labirente dönüşüyor. Örneğin Şekil 7'de böyle bir çizim var. Tasarımcı düzeneğe dahice eklemelerde bulunarak, karşılaştığı sorunları çözmeye çalışmış. Ayrıntılarına girmeye hiç gerek yok. Çünkü bir önceki tasarıma eşdeğer. Fakat, harcanmış olan akıl emeği ortada ve buna yazık. İnsan kendisini, "keşke bu çabalar daha üretken uğraşlar için harcanmış olsaydı" demekten alamıyor.

Suyun kaldırma kuvvetine dayalı bir başka tasarım, Şekil 8'de görülüyor. Kağıt düzlemine dik bir eksen etrafında dönebilen bir kürenin sol yarısı, su dolu bir kabın içinden geçiyor: Sızdırmazlık sağlanmış, sürtünme yok ve iddia şu: Kürenin sol yarısında suyun kaldırma kuvveti olduğuna, sağ tarafındaysa olmadığına göre, bu kürenin saat yönünde dönmesi lazım. Hem de hızlanarak. O kadar ki, kürenin dönme ekseni yere kalın metal çubuklarla sabitlenmiş. Sistem aşırı hız kazanıp da kendi



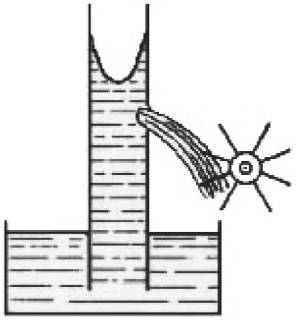
Şekil 8

kendini parçalamasın diye.

Halbuki böyle bir endişeye gerek yok. Çünkü suyun, bu kürenin sol yarı yüzeyi üzerinde uyguladığı basınç, her yerde kürenin merkezine doğrudur. Dolayısıyla noktalardan herhangi birindeki basınçla, o noktaya komşu küçük bir 'diferansiyel' alanın çarpımından oluşan kuvvetin, merkeze göre moment koluyla yaptığı açı sıfırdır. Küre üzerinde dönme momenti uygulayamazlar. Bu durumu daha açık bir şekilde görebilmek için suyun, örneğin kürenin merkezinden geçen yatay eksene göre simetrik konumdaki iki noktada uyguladığı, p ve p′ basınçlarına bakalım. Yatay bileşenler aynı doğrultuda ve sağa doğru olduklarından, üst üste binerler. Zıt yönlerdeki dikey bileşenlerin toplamıysa, $p'>p$ olduğundan, kürenin alt tarafında yukarı doğru net bir bileşen bırakır. Bu durum, suya dalmış olan yüzeydeki benzer tüm "merkezden geçen yataya göre simetrik" nokta çiftleri için geçerlidir. Sonuç olarak, kürenin sol yarısı üzerinde, şekilde gösterildiği gibi, dikey bir F_d ve yatay bir F_y kuvvet bileşeni oluşur. Şöyle ki; toplam net kuvvet F, merkezden geçen doğrultudadır ve küre üzerinde dönme momenti uygulayamaz. Sıvının küreye uyguladığı bu net kuvvet, Newton yasalarından üçüncüsüne göre; kürenin ekseni tarafından küre üzerinde uygulanan, zıt yöndeki ve eşit büyüklükteki kuvvet tarafından dengelenmiştir. Küre, eksenine dayanmış halde kasılı kalır... Çünkü $F(=ma)$ sıfır olunca, a; $T(=1\alpha)$ sıfır olunca da α sıfır olur.

KILCAL YÜKSELMEYE DAYALI TASARIMLAR

Kılcal yükselme bilindiği gibi, su moleküllerinin, örneğin cam yüzeyiyle aralarındaki çekme kuvvetinin, kendi aralarındaki çekme kuvvetine oranla daha büyük olmasından kaynaklanır. Bir tüpteki cam yüzeyi sonuç olarak; temasta olduğu su moleküllerini yukarı doğru çeker, onlar da adeta komşu molekülleri peşlerinden sürükler. Dolayısıyla, kılcal bir borunun alt ucu, örneğin su dolu bir kaba daldırıldığında, su borunun içinde, diyelim h yüksekliği kadar tırmanır ve en üstte, 'meniskus' denilen iç bükey bir yüzey oluşturur. Yüzey içbükey olmak zorundadır, ki su yükselebilsin. Şimdi; cam boru eğer bu yüzeyin yeterince altından, fakat kaptaki su düzeyinin üstünden bir yerden delinecek olsa, su; Şekil 9'da görüldüğü gibi, delikten dışarı akmaya başlayacak gibidir. Akan suyun yerini, kılcal gerilim sayesinde kaptan yükselen yeni suyun alması beklenir. Deliğin önüne minik bir türbin konulabilir ve delikten akan suyun kinetik enerjisi

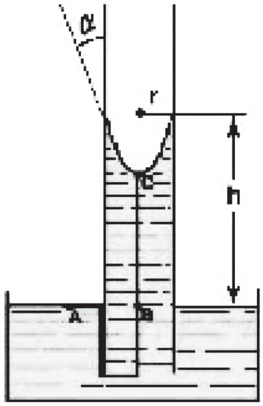


Şekil 9

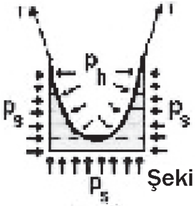
elektriğe dönüştürülebilir. Düşük güçte de olsa, sürekli enerji üreten bir jeneratör elde edilmişe benziyor.

Buradaki analiz hatasını anlamak için, kılcal yükselmeye yol açan etkene yakından bakmak gerekir. Şekil 10'da, örnek bir kılcal boru gösteriliyor. Bu şekildeki A noktasının yakın komşuluğundaki basınç, atmosfer basıncıdır. A ile aynı yükseklikte bulunan B noktasındaki basınç da, yine aynı düzeydedir. B'den C'ye doğru çıkılırken, yükseklik artmaktadır. Bu sırada derinlik azalmakta olduğundan, basınç da azalır. Bu, B ile C arasındaki tüm noktalarda basıncın, atmosfer basıncının altında ve C'ye yaklaştıkça daha da altında olduğu anlamına gelir. Halbuki C'nin hemen üstünde, yine atmosfer basıncı vardır. Bunu mümkün kılan, meniskusun dairesel dış çeperi boyunca etkin olan kılcal gerilimdir. Durumun daha iyi anlaşılabilmesi için, Şekil 11'de cam tüp uzaklaştırılmış. Tüpün yan yüzeylerinin su kütlesi üzerine uyguladığı tepki basıncı, yatay oklarla gösteriliyor. Derinlikle birlikte artan bu yatay basınç bileşeninin yol açtığı kuvvetler, birbirini götürür. Alttaki oklarsa, altta kalan suyun bu düzeyde uyguladığı 'yukarı doğru basınç' olup, atmosfer basıncından düşüktür. Yani, $\rho_s < p_h$ olur. Meniskus üzerindeki havanın basıncı (p_h) oklarla gösterilmiş. Bunların da yatay bileşenleri birbirini götürür. Fakat dikey bileşenleri, alttaki su basıncına baskın ($\rho_s < p_h$) olduğundan, dengelenmek zorunda. Bunu, oklarla gösterilen kılcal gerilimin, yukarı doğru olan dikey bileşeni başarıyor. Kılcal gerilimin yatay bileşenleriyse, keza birbirini götürüyor.

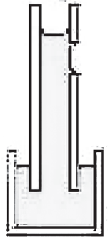
Burada önemli olan nokta; Şekil 10'un C ve B noktaları arasındaki her yerde, kılcal boru içindeki basıncın, dış atmosfer basıncından daha düşük olmasıdır. Dolayısıyla, kılcal



Şekil 11

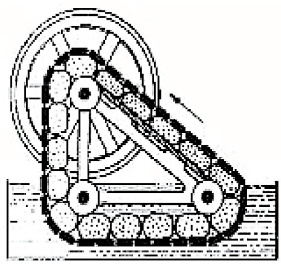


Şekil 10



Şekil 12

borunun duvarında bir delik açılması halinde, su dışarı akamaz; Şekil 12'de görüldüğü gibi, yeni bir meniskus oluşturacak biçimde içbükeyleşir. İç basınçtan büyük olan atmosfer basıncı bunu, tıpkı üzeri kağıtla kapatılmış su dolu bir bardağın ters çevrilmesi halinde içindeki suyun dökülmemesinde oluğu gibi başarır.



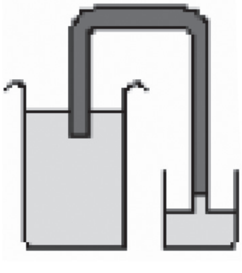
Şekil 13

Dolaylı olarak kılcal gerilime dayanan bir başka tasarım, William Congreve (1772-1829) adlı bir siyasetçi ve keşifçi tarafından 1827 yılında önerilmiş. Şekil 13'te görülen tasarım, Stevin probleminin değiştirilmiş bir biçimini oluşturuyor. Ağırlıklar bu sefer, dik bir üçgenin köşelerine sabitlenmiş makaralar etrafında dönebilen bir palet şeklinde. Paleti oluşturan ağırlıkların altında birer sünger var ve üçgenin alt yarısı suya daldırılmış. Su; soldaki dik kenara paralel asılı süngerlerde, kılcal gerilim sayesinde yükselip, bu süngerleri ağırlaştırıyor. Sağdaki rampadaysa, süngerlerin üzerine binen ağırlıklar suyu sıkıyor. Dolayısıyla bu süngerler daha hafif. Soldakiler ağır basınca, palet makaraların etrafında, saat yönünün tersine dönmeye ve üstteki makaranın eksenine bağlı olan jeneratör çarkını döndürmeye başlıyor.

Burada gözardı edilen nokta, sağ rampadaki ağırlıkların, süngerlerdeki suyu nasıl sıktığı. Ağırlıklar bunu, süngerin gözeneklerindeki kılcal gerilimleri yenip, bu gerilimlere karşı iş yaparak başarmak zorunda. Bu iş için gereken enerjiyi, bunu yaparken uğradıkları yükseklik kaybından alıyor ve sonuç olarak potansiyel enerji kaybına uğruyorlar. Halbuki tepedeki makarayı aşmak üzere tekrar yükselmek ve bu sırada, eşdeğer miktarda enerjiyi tekrar kazanmak zorundalar. Su emerek ağırlaşan soldaki süngerler, ancak bunu sağlayabilirler. Bunu daha net olarak görebilmek için, su damlalarının hangi işlevi yerine getirdiğine bakmak yeterli. Sol taraftaki süngerler tarafından emildiklerinde, ağırlık oluşturuyor, sağ tarafta sıkıldıklarındaysa, bu işlevlerine son veriyorlar. Damlaların bu işlevini, kendimizin yerine getirdiğini düşünelim. Şöyle ki; su dolu kapla süngerlerin ortadan kalktığını ve paletin yerini bir ipin aldığını varsayalım. Biz; sol taraftan bu ipe asılıp aşağıya inebilir ve kazandığımız kinetik enerjiyle alttan, enerji kaybına uğramaksızın, sağ tarafa geçebiliriz. Sahip olduğumuz kinetik enerjiyle, sağ rampadan yukarı doğru tırmanabilir, fakat ancak, başlangıçta soldan ipe asılıp kendimizi bıraktığımız yüksekliğe kadar çıkabiliriz. Çünkü bu bir 'çıkrık' düzeneğidir ve çıkrık bu aşamada durur. Eğer hareketin devamını diliyorsak, ipi sağ taraftan bırakıp, yatay bir doğru üzerinde sol tarafa kayar ve ipe bu taraftan tekrar sarılarak, kendimizi aşağıya bırakabiliriz. Sağda alçalırken uğranılan yerçekimsel potansiyel enerji kaybı nedeniyle kazanılan kinetik enerji, solda aynı yüksekliği tırmanırken yitirilerek, kütleçekimsel potansiyel enerjiye dönüşür. Asıl düzenekteki su damlalarının yaptığı da zaten bundan ibaret olup, "sıfıra sıfır, elde var sıfır"dır...

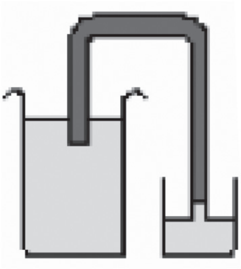
SİFON DÜZENEKLERİ

Sifonların nasıl çalıştığını hemen herkes bilir. Elimize yeterince uzun bir tüp alalım ve alt ucunu, içi su dolu bir kaba daldıralım. Tüpün içindeki ve kaptaki suyun düzeyleri aynı olup, üstleri hava ile doludur. Tüpün üst ucundan emerek içindeki havayı boşaltmaya başladığımızda, içindeki su düzeyi yükselmeye başlar. Bunun nedeni, kaptaki suya etki eden atmosfer basıncıdır. Tüpteki havanın tümünü boşaltıp üst ucunu parmağımızla kapatırsak, içindeki su, normal koşullarda 1 atmosfer olan hava basıncının kaldırabileceği yüksekliğe, yani 10 metreye kadar tırmanır. Şimdi bu tüpü, orta noktasının altından bir yerden bükerek, Şekil 14'te görüldüğü gibi, ters U biçiminde kıvıralım ve uzun kolunu aşağıya doğru bükerek; içi su dolu olan kaptan daha alçak bir düzeydeki boş bir kaba uzatalım. Kapalı tuttuğumuz ucu açtığımızda su, yukarıdaki kaptan aşağıdaki kaba doğru akmaya başlar ta ki üstteki kap boşalana, ya da tüpün uçlarından biri tıkanana kadar. Romalıların bunu bildikleri ve kentlere nakil sırasında suyu, pompa gücü kullanmaksızın, alçak tepelerin üzerinden aşırtabildikleri biliniyor.

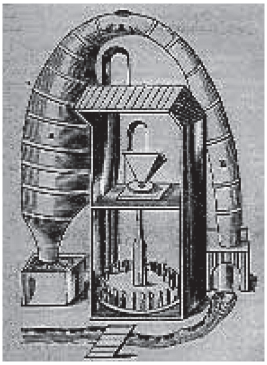


Şekil 14

Eğer bu mekanizmaya, atmosfer basıncını gözden kaçırıp da tıpkı bir makaranın etrafından dolanan bir ipin uçlarına bağlı iki farklı kütleden, ağır olanın düşerken hafif olanı peşinden sürükleyip yukarı kaldırması örneğinde olduğu gibi uzun koldaki suyun, yerçekiminin etkisi altında 'düşme'si ve daha ağır olması nedeniyle kısa koldaki suyu peşinden sürüklemesi olarak bakılırsa, yanılgıya düşülmüş olur. Çünkü bu açıdan bakıldığında, sağdaki kolun daha



Şekil 15



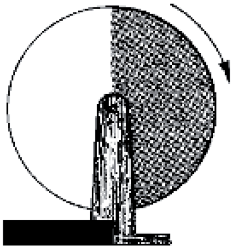
Şekil 16

fazla su içerip daha ağır olması için, mutlaka daha uzun olması gerekmez. Bu amaçla, sağ kol kısaltılıp yarıçapı büyütülebilir; ki bu durumda, Şekil 15'te görüldüğü gibi, sağdaki kabı yükseltip; yerçekimi sayesinde bu sefer, aşağıdaki kaptan yukarıdakine su aktarmak mümkün görünür. Nitekim Şekil 16'da resimde, Vittorio Zonca (1568-1602) adındaki Padualı bir İtalyan keşifçinin, alçaktan su çekip daha yükseğe boşaltarak çalışacağını düşündüğü bir buğday değirmeni için hazırladığı çizim görülüyor. Ters U'nun sırtındaki tıpa, çalışmayı başlatmadan önce boruları suyla doldurmak için gerekli. Halbuki bu tasarımın çalışabilmesi için, su molekülleri arasındaki çekim kuvvetinin, yerçekimi kuvvetinden daha güçlü olması gerekirdi. Böylece, daha ağır olan sağdaki su kütlesi, sol koldaki suyu peşinden sürükleyebilirdi. Ama o zaman da su zaten, sol koldan yükselip sağ kola geçemezdi.

Bu kavram karmaşaları ancak, 17. yüzyılın sonlarında Pascal'ın; sıvı dolu bir kabın herhangi bir noktasındaki basıncın, kabın şekline ya da yarıçapına değil, sadece o noktadan yüzeye olan dikey uzaklığa bağlı olduğunu belirten ilkesini ortaya koymasından sonra aşılabildi.

YERÇEKİMİ KALKANI

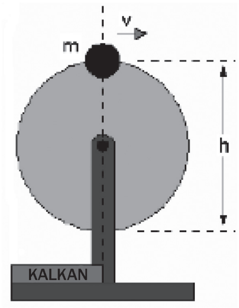
Nasıl ki elektrik alanlarına karşı, metal malzemeden oluşan ve Faraday kafesi denilen kalkanlar yapılabiliyorsa; kütleçekimi kuvvetine karşı bir kalkanın yapımı da, kuramsal olarak mümkün. Her ne kadar nasıl yapılıp nasıl çalışacağı bilinmiyorsa da, Şekil 17'de, böyle bir kalkanın kullanımını içeren bir devr-i daim makinesi öneriliyor. Tasarımda, yatay bir eksen etrafında dönebilen bir disk ve sol yarısının altında yerçekimi kalkanı var. Sağ yarının ağırlık merkezi, merkezden geçen yatay doğru üzerinde olup, merkezden dışarıdadır. Bu yarının ağırlığı nedeniyle, disk üzerinde bir dönme momenti oluşur. Disk sürekli dönerek, enerji üretebilecektir.



Şekil 17

Bunu daha açık olarak görebilmek için, diskin; merkezinden çeşitli uzaklıklardaki nokta parçacıklardan oluştuğunu düşünüp, bunlardan birini ele alalım. Parçacık sağ taraftan inerken, potansiyel enerji kaybedip kinetik enerji kazanacak, soldan yukarı çıkarken de, alttaki kalkan yerçekimini etkisiz hale getirmiş olduğundan, kinetik enerji kaybına uğramaksızın, üst noktaya kadar tırmanacaktır. Dolayısıyla, her dönüşünde mgh kadar kinetik enerji kazanır. Değirmenin suyu nereden geliyor?

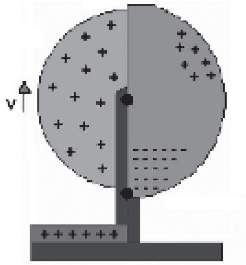
Parçacığa, sol yandan yukarı tırmanırken neler olduğuna bakalım (Şekil 18). Kalkan olmasaydı, yerçekimi parçacık üzerinde mg büyüklüğünde bir kuvvet uygulayacak ve harekete ters yöndeki bu kuvvet, parçacık üzerinde mgh kadar negatif iş yaparak, parçacığın kinetik enerjisini azaltmış olacaktı. Halbuki yerçekimi, kalkan tarafından etkisiz hale getirilmiş. Kalkanın bunu başarabilmesi için; parçacığa hareketinin her noktasında, yerçekimi kuvvetine eşit fakat ona ters yönde, yani hareket yönünde ve yukarı doğru, mg kadar bir kuvvet uyguluyor olması gerekir. Bu, kalkanın parçacık üzerinde mgh kadar pozitif iş yapması anlamına gelir. Böylece, yerçekiminin yaptığı -mgh'lık iş dengelenir. Kuvvet uygulayabildiğine ve iş yapabildiğine göre, bu, sıradan bir kalkan olmaktan çıkıyor. Ya bünyesinde depolanmış olan bir tür enerjiyi kullanıyor, ya da dışarıdan enerji alıyor olması gerekiyor. Anlaşılan bu kalkan; pasif bir unsur değil, kendisi bir makine...



Şekil 18

Peki; elektrik alanı kalkanı, yani Faraday kafesi iş yapmıyor da; bu niye böyle?

Şekil 19'da, benzeri bir 'elektrik alanı motoru' görülüyor. Yalıtkan bir disk, her tarafında eşit yoğunlukta artı yükle yüklenmiş, sağ tarafı kafeslenmiş; sol altındaysa, artı yüklü yalıtkan bir plaka var. Yalıtkan plakadaki artı yüklerin, diskin sol yarısını yukarı doğru itmesi, fakat diğer yarı kafeslenmiş olduğundan, bu yarıyı itememesi lazım. Dolayısıyla, üzerinde bir dönme momenti oluşan diskin, saat yönünde dönmesi beklenir. Halbuki Faraday kafesi iletken yapıda olmak zorunda olduğundan, ona bu özelliği sağlayan değer elektronları, hem sol alttaki plakada, hem de diskte bulunan artı yükler nede-

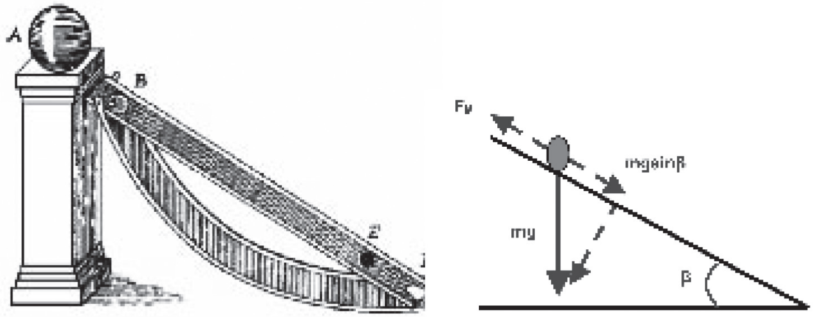


Şekil 19

niyle harekete geçerler. Yaklaşık olarak, şekilde görüldüğü gibi bir yük dağılımı oluşur. Diskin artı yükleri üzerinde şimdi bir de; kafesin alt tarafındaki eksi yüklerin çekme, üst tarafındaki artı yüklerin de itme kuvveti vardır. Disk üzerindeki dönme momenti sıfırlanır ve disk dönemez hale gelir. Gerçi disk üzerinde, yükler nedeniyle bir net kuvvet vardır. Fakat bu kuvvet merkeze doğru olup, disk ekseninin, zıt yönde ve eşit büyüklükteki tepki kuvvetiyle dengelenmiştir. F(=ma) sıfırsa a, T(=Iα) sıfır olunca da α sıfır olur.

MANYETİK KUVVET

1600 yılında William Gilbert mıknatıslar hakkında bir kitap (*de Magnete*) yayımladığında, manyetik kuvvet pek çok insanı etkiledi. Bu arada ortaya, doğal mıknatıslardan yararlanmayı amaçlayan makine tasarımları da çıkmıştı. Bunlardan birisi, İngiliz Kraliyet Topluluğu'nun (British Royal Society) ilk sekreteri olan John Wilkins'in (1614-1672) *Doğal Büyü* (*Natural Magic*) başlıklı kitabında yer alan manyetik devr-i daim makinesiydi. Tasarım aslında Johannes Taisnierus adlı bir rahibe ait olduğundan, "Taisnierus aygıtı" olarak biliniyor. Şekil 20'de görülen bu tasarımda; üstte, üzerinde iki delik (B, F) bulunan düz, alttaysa kavisli birer rampa var. Her iki rampa da sürtünmesiz. Sütun başındaki top (A) bir mıknatısı, E ise demir bir bilyeyi temsil ediyor. Bilye mıknatıs tarafından, düz rampadan yukarı doğru çekiliyor. B deliğine ulaştığında düşerek, kavisli rampadan aşağıya

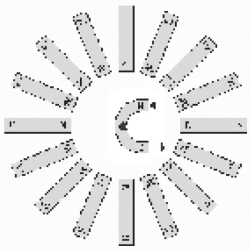


Şekil 20

doğru hızlanıyor. Yolda yavaşlatılıp, F noktasına geldiğinde durması sağlanabilir. Bilye mıknatıs tarafından tekrar, düz rampadan yukarı çekilecek ve bu döngüyü sürdürecektir. Yavaşlatılması sırasında bilyeden alınan enerji, yararlı işe dönüştürülebilir. Dolayısıyla devr-i daim makinesi?

Mıknatısla bilye arasındaki manyetik kuvvetin (F_M), bu iki kürenin merkezleri arasındaki doğrultuda, yani düz olan rampaya paralel olduğunu varsayalım. Bu rampanın yatayla yaptığı açı, bilyenin kütlesi de m olsun. Bilye üzerinde etki eden yerçekimi kuvveti mg, bunun rampa yüzeyine paralel bileşeni de, mgsinβ olur. Mıknatısın bilyeyi rampadan yukarı çıkartabilmesi için; bilyeye uyguladığı manyetik çekme kuvveti F_M'nin, bilye üzerindeki yerçekimi kuvvetinin rampaya paralel bileşenini yenmesi, yani $F_M > mg\sin\beta$ olması gerekir. Dikkat edilecek olursa bu koşul, mıknatıs ne kadar zayıf olursa olsun, sütun yüksekliğini azaltmak suretiyle, sinβ istendiği kadar küçültülerek sağlanabilir. Öte yandan, mıknatıs eğer bunu, bilye rampanın en alt noktasındayken başarabilir ve bilyeyi yukarı doğru harekete geçirebilirse, mesafe kısaldıkça manyetik kuvvet artacağından, daha sonraki noktalarda hayli hayli yapabilecek, hatta bilyeye ivme kazandırabilecektir. Dolayısıyla, eğer bilyenin ağırlığıyla düz rampanın eğimi, mıknatısın gücüyle uyumlu seçilmişse, gerçekten de; bilye F noktasından başlayarak, mıknatıs tarafından, düz rampadan yukarı doğru çekilir. B noktasına vardığında, buradaki delikten düşüp, kavisli rampadan aşağıya doğru yuvarlanmaya başlar. F noktasına vardığında, kazanmış olduğu kinetik enerji bir yöntemle emilerek, bilye durdurulabilir. Mıknatısın çekimiyle, tekrar düz rampadan yukarıya doğru tırmanmaya başlayacak ve döngüyü tekrarlayacaktır. Tasarım doğru görünüyor. Öyle mi?

Burada, belirtilen koşullar altında bilyenin B noktasına kadar tırmanacağı beklentisi doğrudur. Bilye hem de, mıknatısa yaklaştıkça manyetik kuvvet artacağından, ivme kazanarak yolda hızlanacaktır. Ancak, B noktasına vardığında, eğer manyetik kuvvetin dikey bileşeni bilyenin ağırlığı olan mg'den büyükse, bilye yoluna yukarı doğru devam edip, mıknatısa yapışır. B'deki delikten aşağı düşme durumu, ancak aksi halde mümkündür; ki bu durumda, bilye gerçekten de kavisli rampadan aşağıya doğru yuvarlanmaya başlar. Ancak; beklentinin aksine, hızlanmak bir yana, yavaşlayacaktır. Çünkü, bilyeyi düz rampadan yukarı çıkartabilmiş olan manyetik kuvvet hâlâ, ama bu sefer bilyenin hareketinin tersi yönde etkindir. Dolayısıyla, bilyenin düz rampayı tırmanırken kazanmış olduğu kinetik ve potansiyel

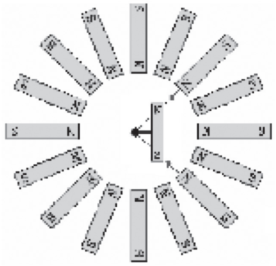


Şekil 21

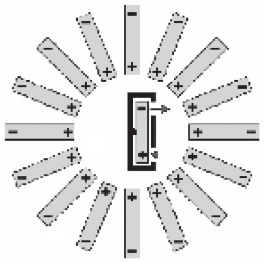
enerji kendisinden geri alınır. F noktasına vardığında, durur. Bu sonucu, bir başka şekilde görmek de mümkün. Manyetik kuvvet, mesafeyle orantılı her kuvvet gibi, muhafazakâr bir kuvvettir. Her muhafazakâr kuvvetin yapacağı gibi, bu kuvvetin de bilye üzerinde; F noktasından başlayıp aynı noktada biten ve dolayısıyla kapalı bir eğri oluşturan döngüsü sırasında yaptığı net iş sıfır olmak zorundadır: Newton yasaları…

Şekil 21'de, basit bir manyetik motor tasarımı var. Merkezdeki mıknatıs U şeklinde olup, ortasından sabitlenmiş. Dış daire üzerine dizilmiş olan mıknatısların hepsinin de kuzey kutupları içe doğru baktığından; U mıknatısın kuzey kutbunu itiyor, güney kutbunu da çekiyorlar. Dolayısıyla, U mıknatısın kutuplarına etki eden net kuvvetler, mıknatısın üzerinde bir dönme momenti oluşturacak gibi. Sonuç olarak mıknatıs, sabitlendiği nokta etrafında hızlanarak dönebilir. Kazanacağı kinetik enerji alındıkça da dönmeye devam edebilir gibi görünse de, bu net kuvvetlerin yönlerinin, şekilde gösterildiği gibi olması mümkün değil. Buradaki yanıltıcı husus bu. Çünkü, bir mıknatısın diğer mıknatıslarla etkileşimi, kuzey kutbundan çıkıp güney kutbundan girdiği düşünülen manyetik alan çizgilerinin yönü ve yoğunluğuyla belirlenir. Dolayısıyla, bu açıdan önemli olan; kutuplar arasındaki malzemenin nasıl bir geometriye sahip olduğu değil, kutupların hangi noktalarda bulunduklarıdır. Hal böyle olunca, U mıknatıs aslında, dıştaki mıknatıslarla etkileşimi açısından, aynı kutuplara sahip bir düz mıknatıs gibi davranır. Nitekim Şekil 22'de merkeze bu sefer bir kolla sabitlenmiş olan eşdeğer bir mıknatıs gösteriliyor ki bu durumda, kutuplar üzerindeki net kuvvetler, oklarla gösterildiği gibi; merkezden geçen doğrultuda olur ve mıknatıs üzerinde dönme momentine yol açamazlar: Newton yasaları. Dolayısıyla, U mıknatıs hız kazanamayacağı gibi; dış çeperdeki mıknatıs kutuplarının kesintisizliği varsayımıyla ve geometrilerinin silindirsel simetrisi nedeniyle, başlangıçta hangi noktada bırakılmış olursa olsun, o noktada durur.

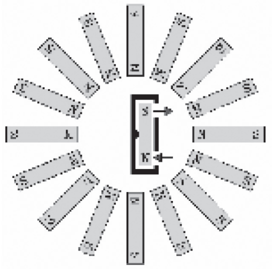
Şekil 23'te, değişik biçimleriyle sık sık başvurulduğundan artık klasik sayılan bir manyetik motor tasarımı görülüyor. Ortadaki düz mıknatıs, merkezi etrafında dönebilecek şekilde sabitlenmiş ve kutupları, uygun biçimde zırhlanmış. Öyle ki, bu kutuplar sadece, sağ yarıdaki mıknatısların kuzey kutuplarıyla etkileşiyor ve güney kutup çekilirken, kuzey kutup itiliyor. Bu mıknatıs hızlanarak döner ve sü-



Şekil 22



Şekil 23



Şekil 24

rekli enerji üretir… mi?

Uzayın belli bir kısmında var olan manyetik alan çizgilerini saptırmak veya zayıflatmak mümkün olmakla beraber, şekilde görüldüğü gibi bir manyetik zırh inşa etmek mümkün değildir. “Ama” denilebilir, “elektrik yüklerine ve alanlarına karşı istenilen geometride zırhlama yapılabiliyor da, manyetik alana karşı niye yapılamasın?…” Gerçekten de, Şekil 23’teki ‘manyetik alan motoru’ yerine, Şekil 24’teki gibi bir ‘elektrik alan motoru’ düşünelim. Burada, dairesel dizilimli yalıtkan çubukların, merkeze bakan uçlarına artı, zıt uçlarına da eksi yükler yerleştirilmiş. Merkezde sabitlenmiş olan ve uçlarında keza zıt yükler bulunan ortadaki yalıtkan çubuğun etrafı, iletken bir plakayla kafeslenmiş. Öyle ki bu çubuktaki yükler sadece, sağ taraftaki çubuklardaki yüklerle etkileşebiliyor. Bütün bunlar mümkün. Fakat ortadaki çubuk, yine de dönmez. Çünkü; bu çubuktaki yüklerin üzerindeki net kuvvetler, şekilde gösterilen kırmızı okların yönünde değil, merkeze doğru olur. Dolayısıyla, çubuk üzerinde dönme momenti uygulayamaz, ona açısal ivme kazandıramazlar: Newton yasaları. Yani manyetik motor önerisindeki zırhın yapımı mümkün olsaydı bile, tasarım yine de çalışmazdı. Peki; böyle bir elektrik alan zırhı mümkün de, manyetik alan zırhı niye değil?

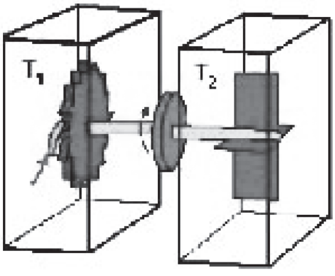
Elektrik alanı zırhı ortadaki yüklerin etrafına yerleştirilirken, zırh malzemesini oluşturan iletken malzemenin atomlarındaki ‘değer (*valens*) elektronları’ harekete geçerek, uygun bölgelere uygun miktarlarla dağılır ve iletken içerisinde yerel net yüklerin oluşmasına yol açarlar. Elektron fazlalığının oluştuğu yerler eksi, elektron eksikliği doğan bölgeler artı yüklü hale gelir. Öyle ki, elektronların, iletkenin iç ve dış yüzeyleri üzerindeki dağılımları; zırhın öbür tarafındaki yüklerin, zırhın içindeki yükler üzerinde daha önce uyguladığı kuvvetleri sıfırlayacak şekilde gerçekleşir. Manyetik zırhta da, buna benzer bir işlevi yerine getirebilecek, hareketli 'manyetik monopol'lere gereksinim vardır. Halbuki doğada bilindiği kadarıyla; sadece eksi yük taşıyan elektron ya da sadece artı yük taşıyan protona benzer şekilde; serbestçe dolaşabilen ve sadece kuzey ya da güney kutbu oluşturan 'manyetik monopoller' yok. Bu yüzdendir ki; uzaydaki herhangi bir hacmin dış yüzeyinden dışarı çıkan elektrik akısı miktarı, o hacmin içerdiği net elektrik yükü miktarıyla orantılı ($4\pi Q$) iken, manyetik alan için bu değer hep sıfırdır.

Tekrarlamak gerekirse; manyetik monopoller var ve istenilen şekilde manyetik zırhlama mümkün olsaydı bile, yukarıdaki 'manyetik alan motoru' yine de çalışmazdı. Çünkü kuvvetler merkeze doğru olur ve orta çubuk üzerindeki dönme momenti sıfırlanırdı. Gerisi yine Newton yasaları...

FEYNMAN'IN YÖNLENDİRİLMİŞ ÇARKI

Şekil 25'teki tasarım, ünlü fizikçi R. P. Feynman'a ait bir tasarımın benzeri. İki kapta, diyelim T_1, T_2 sıcaklıklarında gaz bulunsun. Sağdaki kapta, kanatları düz bir pervane, soldakindeyse, testere dişli bir çark var. Pervane, serbestçe dönebilen bir eksen aracılığıyla, diğer kaptaki çarka bağlanmış ve çarkın dişlerine, örneğin yayla dayandırılmış bir yönlendirici (*ratchet*) konmuş. Mekanik saatlerde benzerleri kullanılan bu yönlendiricileri hepimiz görmüşüzdür: Çark testere dişli olduğundan, yönlendirici, o an için üzerinde bulunduğu dişin az eğimli yüzeyi üzerinden görece kolay kayabilir, fakat kayıp düştükten sonra, dişin dikey yüzüne takılıp kalır. Dolayısıyla, dişli sadece bir yönde dönebilir. Bu da öyle...

Kaplardaki moleküller gelişigüzel yönlerde hareket halinde olup, sağdakiler, pervane kanatlarının yüzeyleriyle sürekli çarpışmaktadır. Bu gelişigüzellik içerisinde tabii, bazen pervanenin bir yüzüne, diğer yüzüne olduğundan ya daha çok sayıda, ya da daha yüksek enerjili moleküller çarpıp, daha fazla momentum aktarabilir. Sonuç olarak oluşan dönme momenti çarkın dönme yönündeyse, çark dönecek, fakat aksi yöndeyse, yönlendirici engeli nedeniyle dönemeyecektir. Yani çark, hep aynı yönde dönmek zorundadır.

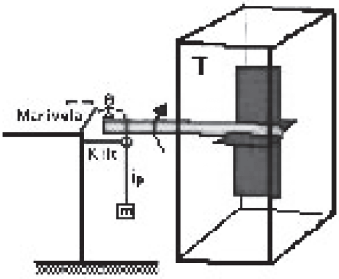


Şekil 25

Yönlendirici, dönme sırasında diş atlayacak ve bir sonraki dişin yüzeyine çarptığında, çarkı ısıtacaktır. Çarkın dönme kinetik enerjisi sonuç olarak, sol kapta bulunan gazın ısıtılmasına harcanır. Dolayısıyla düzenek, iki kap arasında bir ısı aktarım aracı olarak çalışır. Üstelik, T_1 ve T_2 sıcaklıkları ne olursa olsun, sağdaki kapta bulunan moleküllerin kinetik enerjilerinin tamamı, er ya da geç, soldaki kapta bulunan mokeküllerin kinetik enerjilerine dönüştürülebilir gibidir. Halbuki bu olasılık, termodinamiğin ikinci yasasına aykırıdır. Üçüncüsüne de... Çünkü herhangi bir zaman aralığına bakacak olursak; sağdaki kabın uğradığı ısı kaybı, soldakinin kazancına eşittir. Diyelim $T_1>T_2$ idi ve belli bir süre içerisinde, ΔQ kadar ısı aktarımı oldu. Entropi değişimi, ısı değişiminin sıcaklığa oranı ($\Delta Q/T$) olduğuna göre; birinci kaptaki entropi $\Delta Q/T_1$ kadar artarken, ikinci kaptaki $\Delta Q/T_2$ kadar azalmıştır. Net entropi değişimi; artışın artı, azalmanın da eksi işaretiyle toplamı, yani $\Delta S=\Delta Q/T_1-\Delta Q/T_2$ olup, $T_1>T_2$ olduğundan, negatiftir. Halbuki termodinamiğin ikinci yasasına göre, iki kaptan oluşan bu yalıtılmış sistemdeki toplam entropinin artmaması gerekir ve ikinci yasa çiğnenmiş gibidir. Fakat, Feynman bu tasarımının patentini almayıp, ikinci yasaya aykırı olduğundan dolayı asla çalışamayacağını ilan etmiştir. Çünkü...

Bu düzenek, sağ kaptaki gazın sıcaklığı sol kaptakinden daha yüksek, yani $T_2>T_1$ olduğu sürece, beklendiği gibi çalışır. Bu sırada, $\Delta S=\Delta Q/T_1-\Delta Q/T_2$ pozitiftir ve tıpkı pervanenin yüzeyleri gibi, yönlendirici de, moleküllerin gelişigüzel çarpışmalarına hedef olmaktadır. T_1 sıcaklığı T_2'ye yaklaştığında, yönlendiricinin arada bir, molekül çarpmalarından bazılarının etkisiyle, üzerinde bulunduğu dişin dik yüzeyini aşıp, çarkı tutamama olasılığı artar. Sonuç olarak, çark; kâh bir yönde, kâh diğer yönde dönebilmeye ve her iki yönde de ısı aktarabilmeye başlar. $T_2=T_1=T$ sıcaklığında yer alan bu aktarımlarda, $\Delta S=\Delta Q/T-\Delta Q/T=0$ olur. 'Ters' yöndeki dönmeleri engellemek amacıyla yayın sertliğini artıracak olursak, çark bu sefer; 'doğru' yönde dönmekte de zorlanacak ve ısı aktarım aracımız, çalışmaz hale gelmiş olacaktır.

Peki, birinci kabı sistemden çıkaralım. Geride, Şekil 26'da görüldüğü gibi; yalnızca ikinci kap, içindeki pervane, dışarıya uzanan ekseni kalsın ve dışarısı boşluk olsun. Eksenin dış ucuna, ağırlıksız bir ip dolandı diyelim.



Şekil 26

İple eksen arasında yeterince sürtünme, ipin alt ucunda da çok hafif bir kütle var. Soldaki duvarın üstünde sürtünmesiz bir manivela, hemen yan tarafında bir kilit bulunuyor. İp kilidin içinden geçiyor ve manivela sağa sola hareket ettirildiğinde, kilidi açıp kapatıyor. Kilit kapandığında, iple arasındaki sürtünme sayesinde, ipi kavrayıp ağırlığı tutuyor; açıldığında da, ipi serbest bırakıyor. Gerideki platformun üzerindeyse, kahramanımız var. Bir eliyle ipin üst ucunu tutmuş, diğer eliyle manivelayı kontrol ediyor. Şöyle ki; eksen dönmez hale geldiğinde, manivelayı çekip kilidi kapatıyor ve ağırlık, iple kilit arasındaki sürtünme sayesinde sabitlenen ipte asılı kalıyor. Eksen dönmeye başlar başlamaz; önce ipi dönme yönünde sarıp, sonra manivelayı iterek kilidi açıyor, ki eksene sarılan ip, dönen eksenle arasındaki sürtünme sayesinde ağırlığı yükseltsin. Dönme durur durmaz tekrar manivelayı çekip kilidi kapatıyor ve ağırlığı, o anki yüksekliğinde askıya alıyor. Sonra ipin dolanmış kısmını çözüp, bir sonraki dönme için hazır bekliyor. İpi her seferinde; dönme bir yöndeyse bir, diğer yöndeyse diğer yönde sarıyor. Sonuç olarak kahramanımız, manivela sürtünmesiz ve ip de ağırlıksız olduğundan, kendisi enerji harcamaksızın; ipin ucundaki kütleyi, kesintili bir şekilde de olsa hep yükseltiyor ve kabın içindeki ısıl enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürüyor. Kaptaki pervanenin yüzeylerinde dengesiz çarpışmalar yer aldığı sürece, bu süreç devam edebilir ve kaptaki ısıl enerjinin tamamı mekanik enerjiye dönüştürülebilir gibi. Halbuki, bu durum da termodinamiğin ikinci yasasına aykırı. (Üçüncüsüne de...) Çünkü bu yasanın bir başka ifade biçimi, "yalıtılmış bir sistemin ısıl enerjisinin tamamı, mekanik enerjiye dönüştürülemez" şeklinde...

"Ama" denilecektir haklı olarak, "kahramanımız bu kadar seri nasıl davranabilir?" Gerçekten de; dönmenin başladığının veya durduğunun belirlenmesi, gözlem yapmayı gerektirir ve gözlemler, zaman alıcı işlemlerdir. Keza; dönmenin başladığının belirlenmesi halinde, ipin sarılıp manivelanın itilmesi, durduğunun belirlenmesi halinde de, manivelanın çekilip ipin çözülmesi, zaman alan işlemlerdir. Gerçi birinci haldeki, yani dönme başladıktan sonraki gecikmenin, görünürde bir sakıncası yoktur. Çünkü eksen, bu arada kazandığı dönme kinetik enerjisini yitirmez. Fakat ikinci durumda, yani dönmenin durmasıyla ipin kilitlenmesi arasındaki gecikme sırasında; ip serbest olacağından, ucundaki ağırlık aşağıya kayar. Ağırlık, potansiyel enerjisinden bir miktar kaybetmiş ve bu sırada pervaneyi, az öncekinin tersi yönde çevirmiştir. Kaptaki gaz ısınır. Tıpkı bir önceki örnekteki çarkın yönlendiricisinde olduğu gibi, enerji akışı iki yönlüleşmekte ve termodinamiğin ikinci yasası galip gelecek gibi görünmektedir.

O halde; kahramanımızı becerikli olup seri davranmak zorunda kalmaktan çıkartalım ve olası gecikmeleri ortadan kaldırmak üzere, bilgili hale koyalım. Şöyle ki; kaptaki moleküllerin hareketini izleyerek, pervane yüzeylerine hangi moleküllerin hangi hızlarla çarpacağını öngörebilsin ve pervanenin hangi yönde dönüp, ne kadar süreyle ivmeleneceğini, önceden hesaplayabilsin. İpi önceden sarmış olacak, iş manivelayı tıklatmaya kalacaktır. Ancak, moleküllerin hareketini izlemek de gözlem demektir. Kaldı ki pervane yüzeylerine, arkadan gelen daha hızlı moleküller de çarpabilecek ve o anki uygulama planını altüst edebilecektir. Dolayısıyla kahramanımızın, yalnızca birkaç molekülün değil, kaptaki tüm moleküllerin; belli bir andan itibaren izleyecek olduğu patikaların tümünü bilmesi gerekir. Newton yasalarına göre, moleküllerin başlangıç konum ve hızlarıyla aralarındaki etkileşme kuvvetlerinin bilinmesi halinde, bu dev dinamik tabloyu betimlemek mümkündür. Kahramanımızın ilk yapması gereken, ne kadar uzun zaman alırsa alsın; moleküllerin 'başlangıç' konum ve hızlarını belirleyip, aralarındaki etkileşme kuvvetlerinden yararlanarak, her birinin izleyeceği patikayı bütün zamanlar için hesaplamaktır. Tablonun sergileyeceği görüntüyü, bütün zamanlar için yakalamak... Ondan sonra; gelecekte bir an seçip, o andan itibaren uygulamak üzere bir eylem planı hazırlayabilir ve o an geldiğinde, kronometresini çalıştırıp, elindeki planı uygulamaya başlayabilir. İkinci yasa?...

Belli bir 'başlangıç anı' için, 'klasik konumlar' hadi neyse de, 'başlangıç hızları'nın belirlenmesi ayrı bir soru. Ama daha önemlisi; kahramanımızın adım adım, pasif bir unsur olmaktan çıkıp, veri toplayan ve bilgi kullanarak yeni veriler üreten, aktif bir katılımcı haline gelmiş olması. Veri kaydetmek, üzerinde işlem yapmak, silip yeniden yazmak zorundadır ve bu işlemleri dışarıdan enerji almaksızın yapabilmek mümkün değildir. Kahramanımızın, sistemimizin dışından bir yerden enerji alması ve bu arada o yerde, sistemimizde başardığı entropi azalmasından daha fazla miktarda bir entropi artışına yol açması gerekir. İkinci yasa böyle sağlanır.

Bunlar aslında o kadar da, sanılabileceği gibi hayal ürünü süreçler değil. Nitekim; okurlarımız bu anlatımdaki kahramanın, "Maxwell'in cini"ne benzediğini hemen fark etmiştir. Moleküllerin ısıl kinetik enerjilerinden kaynaklanan çarpışmalar sonucunda yer alan 'Brown hareketi', canlı hücrelerin sıvı dolu yapılarındaki protein taşıma süreçlerinde önemli rol oynuyor. Uzayın bir başka bölgesindeki entropiyi artırmak pahasına, belli bir bölgesindeki entropiyi azaltan Maxwell'in ciniyse, sinir sistemimizin çalışmasını sağlayan 'iyon kanalı' ve 'iyon pompası' mekanizmalarından sorumlu. Keza beynimizin çalışmasından... Bilgi işleme süreçleri, gerçekten de enerji yoğun olsa gerek ki beynimiz vücudumuzun kullandığı enerjinin dörtte birini tüketiyor.

Devr-i daim makineleri hakkında, şimdilik bu kadar. Bir de tabii; varlığı hakkında tekrarlanabilir nitelikte, bilimsel somut herhangi bir kanıt bulunmayan; boşluk enerjisi, uzay enerjisi, yok bilmem hangi gezegen ya da yıldızdaki insanüstü varlıkların ışınladığı enerji gibi; 'gizli' ve gizemli enerji türlerinin varlığı yönünde iddialar var. Bunlarla hiç zaman kaybetmeyelim arzu ederseniz...

KAYNAKLAR

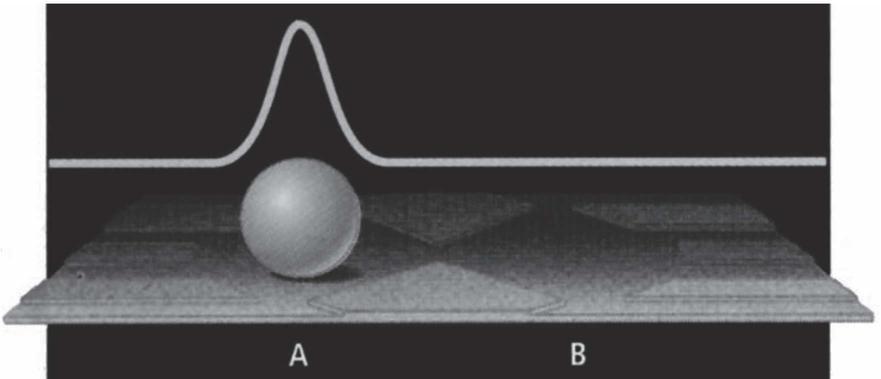
Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M., *Lectures On Physics*, c. l, Addison-Wesley, 1966.
http://www.lhup.edu/~dsimanek/museum/unwork.htm
http://www.brainyencyclopedia.com/encyclopedia/h/hi/history_of_perpetual_motion_machines.html
http://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamics#The_basic_concepts_of_Thermodynamics#The_basic_concepts_of_Thermodynamics
http://www.brainyencyclopedia.com/encyclopedia/s/se/second_law_of_thermodynamics.html

KUANTUM ÖLÇÜMÜ SORUNU VE EVERETT'İN ÇOKLU DÜNYALARI

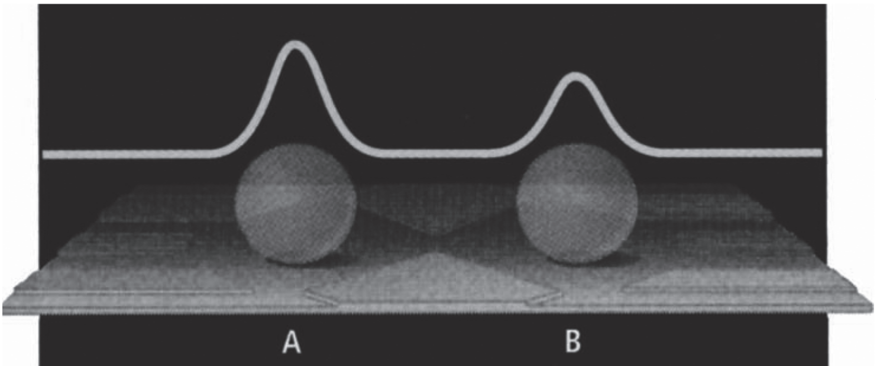
Kuantum mekaniği: Kuantum mekaniğinde henüz yanıtlanmamış olan bir soru, parçacıkların bileşik kuantum durumları ile, gözlemlediğimiz klasik dünya verileri arasındaki ilişkinin ne olduğudur. Kopenhag yorumu ve Hugh Everett'in çoklu evrenler tezi, kuantum ölçümü sorusuna, çarpıcı biçimde farklı iki yanıt veriyor. Gerçi başka yorumlar da var. Ama Everett'in 50'li yıllarda yaptığı çalışmaya ilgi giderek artıyor...

Önümüzde bir parçacık, örneğin bir elektron olduğunu varsayalım. A ve B noktalarında, bu elektronu yakalayabilecek; örneğin artı yüklü iki iyonun oluşturduğu; nano ölçekte iki potansiyel çukurundan oluşan, iki tuzak bulunsun. O halde elektron, A veya B'de olabilir. Eğer A'da yakalanmışsa, dalga fonksiyonu ve dolayısıyla, konumuyla ilgili olasılık dağılımı; A'da bir zirveye ve tüm diğer noktalarda sıfır değerine sahip olan bir 'delta fonksiyonu' şeklindedir (φ_A). Şekil 1'dekine benzeyen... B noktasında yakalanmış ise; bu noktada zirveye, diğer noktalarda sıfır değerine sahip olan, başka bir 'delta fonksiyonu' şeklinde (φ_B)... Bunlar sistemin, yani elektronun bulunabileceği 'özgün durum dalga fonksiyonları'nı oluşturmaktadır.

Başlangıçta elektronun A tuzağına yakalanmış, yani dalga fonksiyonunun φ_A olduğunu varsayalım. Sonra sol taraftan, yönü sola doğru olan bir elektrik alanı uygulayarak, elektronu harekete zorlayalım. Eksi yükler üzerindeki elektrik kuvveti alana ters yönde olduğundan, elektron B tuzağına doğru harekete geçer. Yani, $\varphi_A$dalga fonksiyonundan sıyrılıp, φ_B dalga fonksiyonuna bürünme sürecine girer. Fakat, yeterince kısa bir süre sonra, bu geçiş tamamlanamadan, elektrik alanını ortadan kaldıralım. Elektron 'iki arada bir derede' yakalanır. Diyelim B'ye geçişi %36 oranında tamamlamış, %64 oranında da A'da kalmış olsun. Bu 'bileşik durum'daki dalga fonksiyonu, Şekil 2'de görüldüğü gibidir ($\varphi=0,8\varphi_A+0,6\varphi_B$). Dikkat edilecek olursa, iki özgün durum fonksiyonunu çarpan katsayıların, yani genliklerin kareleri, elektronun bu özgün durumlarda bulunma olasılıklarını vermektedir. Öte yandan, bileşik dalga fonksiyonunu, olası özgün durumlarla genliklerinin bir listesi olarak düşünmek de mümkün.



Şekil 1: Elektronun A tuzağında ikenki 'özgün durum dalga fonksiyonu' φ_A.



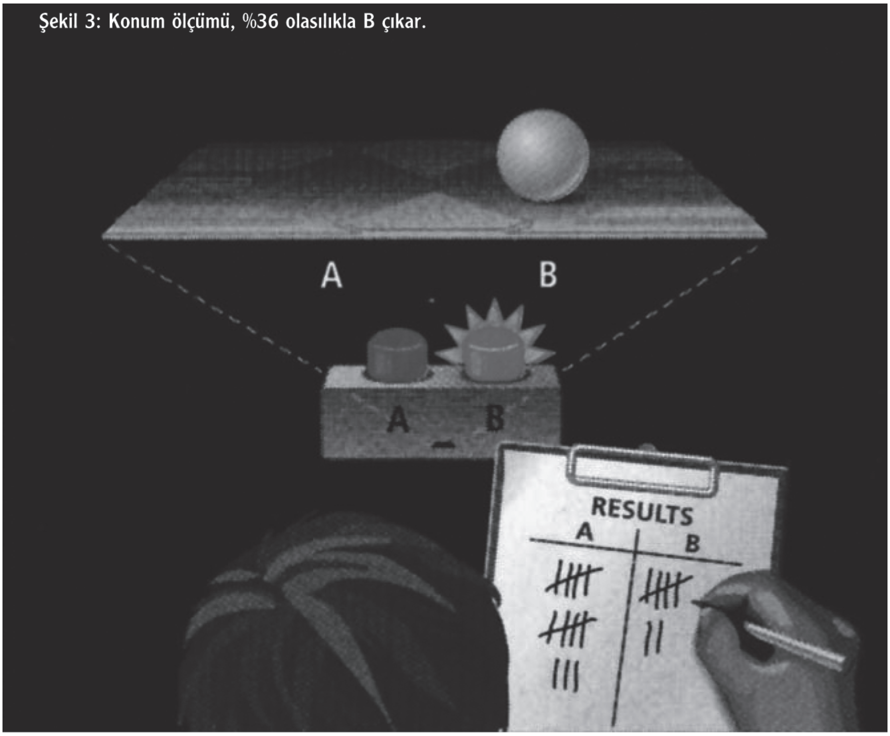
Şekil 2: Bileşik durum dalga fonksiyonu: $\varphi=0{,}8\varphi_A+0{,}6\varphi_B$.

Konum	Genlik	Olasılık
A	0,8	%64
B	0,6	%36

Bileşik dalga fonksiyonuna eşdeğer tablo.

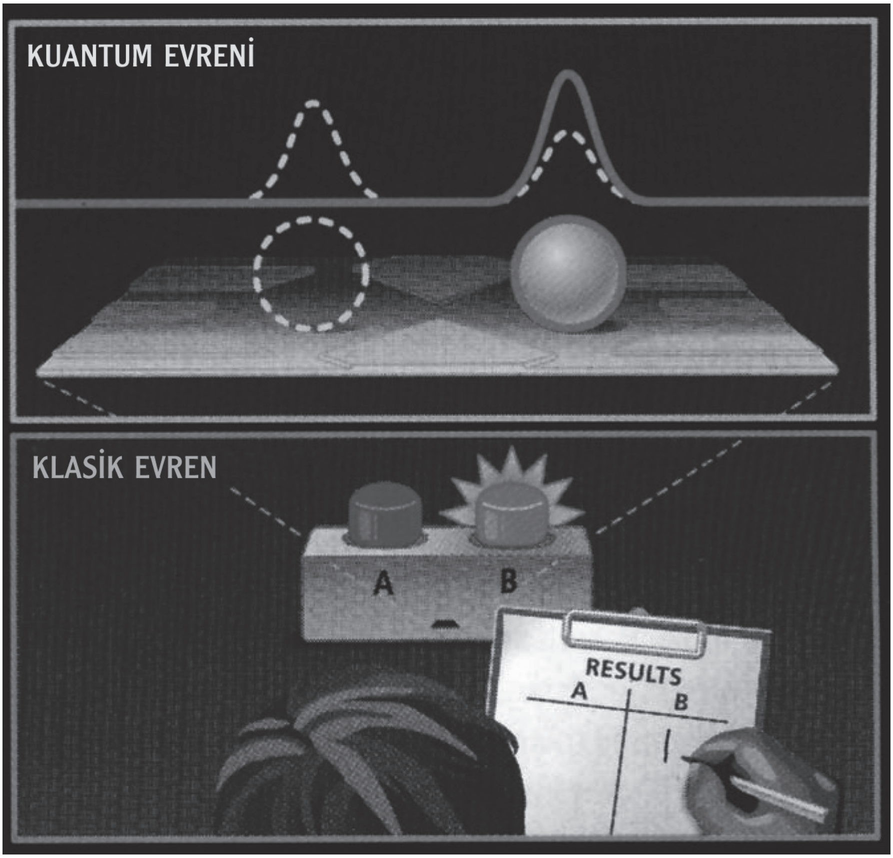
Kuantum mekaniğinin bir garipliği şu: Sistem, yani örneğimizdeki elektron, bileşik kuantum durumunda iken konumu ölçüldüğünde, ilk elde ölçümün bize, A ve B'nin, %64 ve %36 olasılıklarıyla tartılmış ortalamasını vermesi beklenebilir (0,64A+0,36B). Halbuki öyle değil; iki değerden birini rasgele olarak verir. "Peki o zaman; %64 ve %36 olasılıkların anlamı nedir?..." Şu: Aynı deney yeterince fazla sayıda kez tekrarlandığında, ölçümlerin %64'ü A, %36'sı da B değeriyle sonuçlanır. Daha genel olarak; bileşik durumda olan bir sisteme ait fiziksel değişkenlerden birisi ölçüldüğünde, karşımıza bu fiziksel değişkenin, bileşik dalga fonksiyonunu oluşturan özgün durum dalga fonksiyonlarından *rasgele* birine ait olan özdeğeri, o özgün

Şekil 3: Konum ölçümü, %36 olasılıkla B çıkar.



durum fonksiyonunun *genliğinin mutlak değerinin karesiyle orantılı bir olasılıkla* çıkar. Tek bir ölçümle bir ‘ağırlıklı ortalama değer’ bulmak mümkün değildir…

Ölçüm sonuçlarının A ve B’nin ağırlıklı ortalamasını değil de, A veya B’yi veriyor olması, hemen akla şu soruları getiriyor: “Peki, bir dizi ölçüm sonucunun sergilediği olasılık dağılımı tamam; bu klasik olasılıklar kuramında da var. Ama herhangi bir ölçüm sonucunda A ya da B değerinin karşımıza çıkmış olması, elektronun ölçümden hemen önce A ya da B noktasında olduğu anlamına gelmez mi? Hal böyle olunca, elektronun ölçüm öncesinde bulunduğu konumun kuantum mekaniğiyle kesin olarak saptanamayışı; kuramın eksik ve bazı ‘gizli değişkenleri gözden kaçırıyor olmasından kaynaklanıyor olamaz mı? Bu gizli değişkenleri de hesaba katan daha ‘tamam’ bir başka kuram, konumu kesin olarak saptayamaz mı?…” Gerçi daha sonra yapılan ‘Bell deneyleri’, geçerli bir ‘gizli değişkenler kuramı’nın var olması olasılığını, hemen tümüyle ortadan kaldırdı. Fakat o zamanlar, Albert Einstein’in kuantum mekaniğine ilk itirazları bu doğrultudaydı. Kuramın kurucuları olan Niels Bohr ve Werner

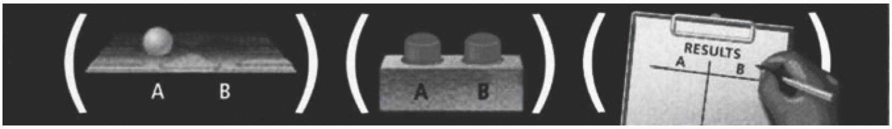


Şekil 4: Kopenhag yorumu. Niels Bohr'un başını çektiği gruba göre, ölçüm yapan aygıtlar (ve insan), kuantum dünyasından farklı, klasik bir dünyada bulunmaktadır. Böyle klasik bir aygıt, bileşik durum üzerinde bir ölçüm yaptığında, kuantum dalga fonksiyonunu, seçeneklerden rasgele birinin üzerine göçertirken, tüm diğer seçeneklerin yok olmasına yol açar. Kuantum mekaniği denklemleri, böyle bir çöküşün neden yer alması gerektiğini açıklamıyordu; bu, ayrı bir varsayım, denklemleri ihlal eden ek bir süreç olarak ilave edildi.

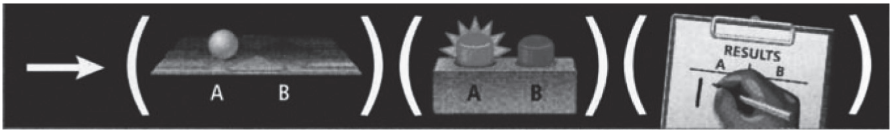
Heisenberg'in başını çektiği 'Kopenhag okulu'nun verdiği yanıt şu anlama gelmekteydi: "Hayır. Elektron, aynı deneyin tekrarıyla yapılan ölçümlerin %64'ünün hemen öncesinde A noktasında ve %36'sının da hemen öncesinde B noktasında değil; tümünün hemen öncesinde, %64 olasılıkla A noktasında ve %34 olasılıkla da B noktasında olmak üzere, aynı anda her iki noktada birden bulunmaktadır." Bu yanıtın geçerliliği, daha sonra yapılan 'girişim deneyleri'yle kanıtlandı. Klasik algılarımıza ters düşse de, elektronun aynı anda iki yerde birden bulunabildiği durumlar var. Çünkü bir elektron tabancasıyla, üzerinde yan yana iki yarık bulunan bir plakaya doğru, birbirleriyle etkileşmelerine fırsat vermeyecek kadar uzun zaman aralıklarıyla, teker teker gönderilen elektronlar; plakanın arkasındaki bir filmin üzerine düştüklerinde, girişim saçakları oluşturuyor. Yani, tıpkı bir dalga gibi, yarıkların ikisinden birden aynı anda geçiyorlar. Öyle olmasaydı, elektronların her biri yarıkların yalnızca biri ya da diğerinden geçiyor olsaydı; filmin üzerinde, elektron tabancasının ucundan başlatılıp yarıklardan geçirilen doğruların filmi kestiği iki noktada dikey birer çizgi oluşurdu, o kadar... Dolayısıyla, elektron hem dalga, hem de parçacık gibi davranıyor.

Dalga davranışında dahi; elektronun iki noktada birden aynı anda bulunabilmesi, bu sefer de bir başka soruya yol açıyor: A ve B noktalarının ikisinde birden bulunan bu elektron, ölçüm yapıldığında ansızın bunlardan birisinde, örneğin B konumunda, neden ve nasıl belirmekte? Elektronu temsil eden bileşik dalga fonksiyonu neden ve nasıl, A'daki eteğini apar topar toplayıp B'ye kaçıyor?... Bohr'un, sorunun 'neden' kısmına verdiği yanıt; ölçüm sürecinin pasif bir süreç olmayıp, aktif olduğu şeklindeydi: Ölçüm aygıtı ve gözlemci, üzerinde ölçüm yapılan kuantum sisteminin dışında, makroskopik ölçekte klasik birer sistem. Bu klasik sistem, bileşik durumdaki bir kuantum sistemi üzerinde ölçüm yaparken, onu etkiler. 'Nasıl'ı da şu: Bileşik fonksiyonu, özgün durum fonksiyonlarından rasgele birine göçerterek... Örneğimizdeki $\varphi=0,8\varphi_A+0,6\varphi_B$ bileşik dalga fonksiyonunu, %64 olasılıkla φ_A'ya ve %36 olasılıkla da cpe'ye göçer ve aygıt ölçüm sonucu olarak, örneğin ibresiyle, o özgün durum fonksiyonuna ait özdeğeri gösterir. Gözlemci de bu sonucu hafızasına kaydeder. Örneğin biz, kaba konum teshirlerinde gözümüzü kullanırız ve bu makroskopik aygıt, her nesne için tek bir konum ölçer. Hal böyle olduğundan, biz asla, örneğin bir bilardo topu gibi makroskopik bir nesneyi aynı anda iki yerde birden görmeyiz. (Öyle mi acaba?)...

Elektronun parçacık davranışıyla ilgili sorular da vardı tabii: 'Bileşik kuantum durumundaykenki ölçüm sonucu tamam; A ya da B olacak; ama ölçüm öncesinde bileşik kuantum durumundaki elektronun konumu 'aslında' nedir? Acaba A ile B arasında bir yerde midir?" Heisenberg'in yanıtı 'hayır'dı. Nedeni şu: Bir sistemi, fiziksel değişkenleri betimler ve değişkenlerinin hepsi belirlenmişse, sistem tam olarak, yani 'iyi tanımlanmış' olur. Fiziksel değişken nedir? Sistemin ölçülebilir bir özelliği. O halde, bir 'fiziksel değişkenin ölçülebilir olması şart: Ölçülebilirse anlamlı, aksi halde anlamsız. Demek ki, fiziksel değişkenin anlamı, ölçülebilir olmasında yatıyor. Örneğin bir "parçacığın konumu" ifadesi, "parçacığın konumu"nun ölçülebileceği



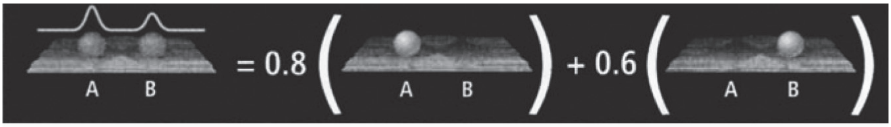
a) Parçacık A'da iken, her üç sistem de birer özgün durumdadır ve toplam dalga fonksiyonu, üçünün dalga fonksiyonlarının çarpımından oluşur: $\varphi_{T}= \varphi_{A}. \varphi_{\ddot{O}}. \varphi_{G}$.



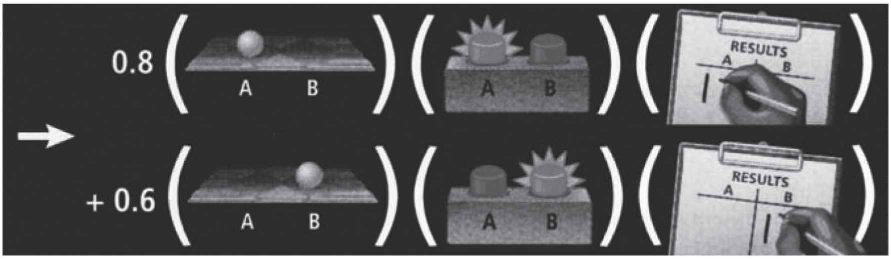
b) Ölçüm aygıtı sadece A değerini ölçebilir, A düğmesi yanar ve gözlemci, fotonlar kendisine ulaştığında, hafızasında A sütununu işaretler.

Şekil 6: Elektron özgün durumlardan birinde, örneğin A konumunda iken, tek bir ölçüm var; ölçüm aygıtı ve gözlemci ayrışmaz.

uygun bir deney tanımlanabiliyorsa anlam taşır, aksi halde taşımaz. O halde ölçme, anlam kazandıran bir eylem: "ölçme eşittir anlam." Öte yandan, fiziksel değişken ne zaman var?... Fiziksel değişkenin anlamı ölçülebilir olmasında yattığına göre; ölçüldüğünde var, aksi halde yok. O halde ölçme, aynı zamanda yaratıcı bir eylem: "ölçme eşittir yaratmak". Ölçüm, fiziksel değişken olmaya aday bir niteliğe sadece anlam kazandırmakla kalmıyor; ona ait özgün bir 'özdeğer'i çıkarıp ortaya koyuyor, adeta yaratıyor. Sonuç?... Fiziksel değişkenler ölçüm anında var ve anlamlı, aksi halde yok ve anlamsız. Ama biz klasik dünyadaki yaşamımızda, parçacık üzerinde yaptığımız bir dizi gözlemden hareketle, parçacığın geçmişine ait anlık fotoğraflar oluşturup, bunları birleştirerek ve hatta, üzerinde gözlem yapmadığımız zaman aralıklarındaki boşlukları da doldurarak; "parçacık önce şuradaydı, sonra şu momentumla buraya geldi, arada şu patikayı izlemiş olmalı" gibi tasarımlar inşa edebiliriz. Büyük ölçekli dünyamızdaki, örneğin çakıl taşlarını suda sektirme deneyimlerimizin kazandırdığı alışkanlıklardan hareketle... Böyle bir tasarımı gerçek saymak, ona gerçeklik atfetmek; bu isteğe bağlı, kişisel bir tercih. Heisenberg'in tercihi, bunların gerçek olmadığı yönündeydi. Ona göre durum; üzerinde ölçüm yapılmadığı sırada, elektronun belli bir konumda değil, dalga fonksiyonunun belirlediği olasılık dağılımına karşılık gelen 'elektron bulutu'ndaki her yerde olduğu şeklindeydi. Yani, kuantum mekaniği kesin sonuçlar değil, yalnızca, bir dizi olası sonucun gerçekleşme olasılıklarını verir. "Parçacığın klasik patikası



a) Parçacık bileşik durumda iken, dalga fonksiyonu $\varphi= 0,8\varphi_A+0,6\varphi_B$ şeklinde.



b) Üçlü sistemin toplam dalga fonksiyonu, $\varphi_T=(0,8\varphi_A+0,6\varphi_B).\varphi_Ö.\varphi_G$ ikiye ayrışır: $0,8\varphi_A.\varphi_Ö.\varphi_G$.

Şekil 7: Elektron bileşik durumda iken, %64 olasılıkla A, %34 olasılıkla B değeri ölçülmüştür; ölçüm aygıtı ve gözlemci ikiye ayrışır.

sadece, biz o gözlem dizisini yapmış olduğumuz için ortaya çıkıyor"; beliriyor, varlık kazanıyor: Aksi halde yok, gözlem yapmasaydık oluşmazdı. Einstein'ın buna yanıtı, "Ay kimse bakmazken de orada" oldu, Dünya'nın etrafında dolanıyor...

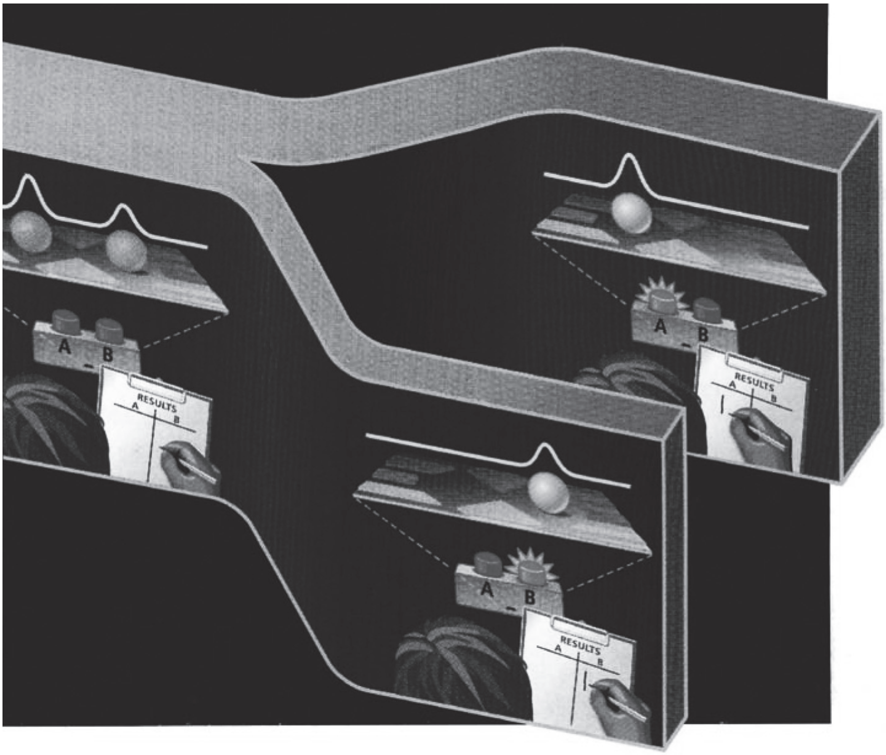
Kopenhag okulunun bu yorumu, ölçmeye ve gözlemciye, çok özel bir statü tanıyor; onu aktif bir öge olmaktan öte, algıladığımız klasik evrenin yaratıcısı, adeta Tanrı konumuna yükseltiyordu. Öte yandan, yorum evreni ikiye ayırmıştı. Birincisi; her bir farklı gerçekleşme olasılıklarına sahip bileşenlerden oluşan bileşik kuantum durumundaki bir sürü alt sistem içermesi nedeniyle, adeta bir seçenekler okyanusu barındıran 'kuantum dünyası'. İkincisi; bizim gibi iri kıyım sistemlerden oluşan ve içinde yapılan gözlemlerin, kuantum dünyasının barındırdığı olasılık kümelerinden bazılarını, üyelerinden rasgele birerinin üzerine göçerttikten sonra çekip çıkartarak sunduğu verilerin resmettiği 'klasik dünya'. Bazı kuramcılar ise, kuantum mekaniğinin yorumuna yönelik tartışmaları yersiz buluyordu. Örneğin Paul Dirac fizik modellerinin, küçük ölçekteki fiziği bizim için, günlük yaşamda karşılaştığımız nesnelerle ilişkilerimiz çerçevesinde geliştirmiş olduğumuz 'günlük dil'de anlayabileceğimiz hale koymak zorunda olmadığı kanaatindeydi. İyi bir modelin yargıcı, deneysel olarak sınanabilen fiziksel nicelikleri hesaplayabilmemiz açısından kullanışlılığı, bu yöndeki becerilerimize katkısı idi. Kuantum mekaniğinin matematiği ise, o zamana kadar çözülememiş olan bir sürü problemi çözmüştü. Hâlâ da çözüyor. Model başarılı olduğu sürece, ‘asgari’ (minimalist) yorumla yetinip, çalışmaya devam etmek lazımdı. Bu yüzden, kuantum kavramları hakkında somut canlandırmalar talep edenlere, “kapa çeneni ve hesapla” diyordu. Kendi öyle yaptı ve 1933 yılı Fizik Nobel Ödülü’nü aldı.

Bu açıdan bakıldığında kuantum mekaniği kuramının matematiği sadece, deney ve gözlemlerin, kuantum dünyasının barındırdığı olasılıklardan hangilerini çekip çıkartacağını öngörmeye yarayan bir araçtır. Kuramı kullanarak, klasik dünyayı oluşturan verilere anlam verilebilir. Ancak bunun tersi; yani klasik dünya gözlemlerinden hareketle, bir bakıma geriye bakıp, kuantum dünyasına anlam vermek mümkün değildir. Klasik dünya ‘gerçeklik’tir. Kuantum dünyası ise, isim verilmesi gerekirse; ‘potansiyel gerçeklik’... Ancak Kopenhag yorumu, bu iki dünya arasına bir sınır koyamıyor ve kuantum dünyasının nerede bitip, klasik dünyanın nerede başladığı sorusuna yanıt veremiyordu. Kaldı ki, tanımlanabilse dahi, bu sınır yapay görünüyordu. Çünkü, her biri birer kuantum sistemi oluşturan parçacıklardan oluşan makroskopik nesneler de birer kuantum sistemi oluşturması mümkündü; “neden olmasın?...” İtirazlar çoğaldı: “Eğer herhangi bir fizik kuramının deneyimler dünyamız için sadece bir model olduğunu kabullenirsek, ‘doğru kuram’ı bulabilmek ümidini tümüyle terk etmemiz gerekir; çünkü deneyimlerin tümüne erişmemiz imkânı yok”...

Öte yandan, bileşik dalga fonksiyonunun, ölçme sırasında (ne zaman?) özgün durumlardan birine göçtüğü tezi, eleştirilerin bir diğer odak noktasını oluşturmaktaydı. Gerçi, olasılık dağılımlarının gözlem sonucunda olası değerlerden birine çökmesi, tanışık olmadığımız bir kavram değildir. Örneğin, madeni bir parayı yazı-tura atmak için fırlatıp tuttuğumuzda, elimizi açana kadar paranın yazı veya tura gelmesi olasılıkları %50-50 iken, elimizi açtığımızda, yani parayı gözlediğimizde, bu olasılık dağılımı, para yazı çıkmışsa eğer, %100 yazı ve %0 turaya göçer. Klasik mekaniğe göre, paranın fırlatılma biçimi ve havanın sürtünmesi vb. doğru olarak göz önünde bulundurulursa, sonucun yazı mı tura mı olacağını önceden hesaplayabilmek mümkündür. Ama para eğer ‘kusursuzca rasgele’ fırlatılırsa, varsa bunun yöntemi; o zaman söylenecek bir şey kalmaz. Fakat ‘göçme tezi’ kuantum mekaniğinin matematiği açısından da sorunluydu. Çünkü, Schrödinger denklemine göre, dalga fonksiyonu zamanla ‘deterministik’ ve ‘yumuşak’ bir şekilde, sürekliliğini koruyarak değişmek, ‘evrilmek’ zorundaydı. Ne de olsa diferansiyel bir denklem olduğundan; devrim ya da deprem niteliğindeki değişimleri bu matematikten türetmek mümkün değildi. O yüzden, Bohr'un 'göçme tezi' kuantum mekaniğine, matematiğinden bağımsız ve hatta bu matematiği ihlal eden, ayrı bir hipotez olarak ilave edilmişti. John von Neumann tarafından daha sonra, kuramın cebirsel betimlemesinde, göçme işlemine karşılık gelen bir 'operatör yöntemi' geliştirildi. Ama kuram bazılarına göre 'yamalı bir araç' haline gelmişti. Halbuki, ilke olarak, kuramın önden gitmesi gerekirdi. Hugh Everett bu düşüncelerden hareketle, 50'li yılların başlarında, bu hipoteze gereksinimi ortadan kaldıran bir yorum geliştirdi.

Everett 1930 yılında doğmuş, 1943 yılında, henüz ortaokulda iken Einstein'a bir mektup yazmıştı. "Karşı konulamaz bir kuvvetin, hareket ettirilemez bir kütleyle buluşması" halinde ne olacağını sorup yanıtını almıştı. 1953 yılında Princeton Üniversitesi'nde doktora çalışmalarına başladı. Eugene Wigner ve John Archibald Wheeler'dan kuantum mekaniği dersleri aldıktan sonra, Wheeler'ın danışmanlığında tez çalışmasına başladı. Kuantum mekaniğinin garip görünen imaları dikkatini çekmişti. Öte yandan, evren aslında karşılıklı etkileşim halindeki pek çok kuantum mekaniksel sistemden oluşuyor, yani kendisi de kuantum mekaniksel bir sistem oluşturuyordu. Hal böyle ise eğer, onun da 'evrensel bir dalga fonksiyonu'nun olması gerekirdi. Bu durumda, evrenin dalga fonksiyonu üzerinde bir gözlem yapmak için, dışına çıkmak lazımdı. Halbuki sonlu bir evrende bu mümkün olmadığından; evren hakkında yapılabilecek herhangi bir gözlemin, dışarıdan değil, içeriden yapılabilmesi gerekiyordu. O halde, gözlemci ile aygıtı; bu kuantum mekaniksel sistemin birer alt parçası olmalıydılar. Üç yıl sonra tezini tamamladığında, kuantum mekaniğinin çok farklı bir yorumunu sundu. Kabaca şöyle...

Gözlemci ve aygıtı, elektronun oluşturduğu kuantum sistemi üzerinde dışarıdan gözlem yapan ve gözlem sonucunda onu etkilemiş olacak olan klasik bir sistem değil; onunla karşılıklı etkileşim halinde olan, kuantum mekaniksel iki başka sistemdir. Böyle üçlü bir kuantum sisteminin toplam dalga fonksiyonu, alt sistemlerin dalga fonksiyonlarının (vektör) çarpımı şeklinde yazılabilir. Gözlemci ile aygıt, kendilerine ait özgün durumlardan birerinde bulunsunlar. Bu özgün durum dalga fonksiyonlarını, ölçüm aygıtı için $\varphi_{\text{Ö}}$, gözlemci için de φ_G ile gösterelim. Deneyimizdeki elektronun da özgün durumlardan birinde, örneğin A konumunda bulunduğunu, yani dalga fonksiyonunun φ_A olduğunu varsa yalım. Üçlü sistemin toplam dalga fonksiyonu $\varphi_T = \varphi_A - \varphi_{\text{Ö}} . \varphi_G$ olur. Bu durumda, Şekil 6'da görüldüğü gibi; aygıt



Şekil 8: Ayrışan iki kuantum durumu, zaman yolculuklarına ayrı ayrı devam ederler. Ancak, Schrödinger denkleminin özgün durum çözümleri birbirine dik (ortogonal) olduğundan, gözlemcinin A değerini gözlemlemiş olan kopyası, B değerini gözlemlemiş olan kopyasıyla etkileşemez. Birbirlerinin bilincinde olmaları mümkün değildir, ayrışmış olan evrenin birbiriyle iletişimsiz iki dalındadırlar.

yalnızca A değerini gösterebilir, aygıtın A düğmesi yanar ve gözlemci, fotonlar kendisine ulaştığında, hafızasına A verisini kaydeder. Bundan böyle A verisini hatırlayacak ve gerektiğinde davranışlarını bu veriye göre düzenleyecektir. Burada bir ikilem yok. Yadırgamadığımız bu kuantum durumuna, 'klasik durum' da deniyor.

Şimdi de, ölçüm aygıtı ile gözlemcinin yine özgün durumlarından birinde, fakat elektronun bileşik kuantum durumunda olduğunu varsayalım. Bu durumda, üçlü sistemin toplam dalga fonksiyonu ikiye ayrışır. Dalga fonksiyonuyla birlikte, ölçme aygıtı ve gözlemci de ikiye ayrışmıştır. Birinci kısımda, ölçülme olasılığı %64 olan A değeri ölçülmüş ve gözlemci tarafından hafızaya kaydedilmiştir. İkinci kısımda ise, ölçülme olasılığı %36 olan B değeri ölçülmüş ve gözlemci hafızasına bu değeri kaydetmiştir. İki kuantum durumu, zamandaki yolculuklarına ayrı ayrı devam ederler. Ancak, Schrödinger denkleminin özgün durum çözümleri birbirine dik (ortogonal) olduğundan, gözlemcinin A değerini gözlemlemiş olan kopyası, B değerini gözlemlemiş olan kopyasıyla etkileşemez. Birbirlerinin bilincinde olmaları mümkün değildir. Everett'in 'çoklu evrenler yorumu' böyle. Şimdiye kadar yapılmış olan kuantum deneyleri aksine bir kanıt vermedi.

Tez bittiğinde, Wheeler öğrencisinin çalışmasını Bohr'a götürdü. Fakat Bohr sunulan görüşlere itibar etmedi. Tezi Princeton'daki jüriye, büyük oranda kısaltıp, savlarını yumuşatarak sunmak zorunda kaldılar. Everett hayal kırıklığına uğramıştı, akademik yaşamdan uzaklaştı. Savunma bakanlığında araştırmacı olarak işe girip, 'Silah Sistemlerini Değerlendirme Grubu'na katıldı. Soğuk Savaş sırasında uygulanan nükleer savunma doktrinleri, önemli oranda onun geliştirdiği algoritmalara dayanan stratejilerle geliştirildi. Daha sonra özel danışmanlık şirketleri kurup, milyoner oldu. Bu arada evlenmiş, bir oğluyla bir kızı olmuştu. Pek mutlu olduğu söylenemezdi ama. Zincirleme sigara içen bir alkolikti. İnsanlara uzak, ailesiyle ilişkileri kopuktu. Kızı intihar girişimlerinde bulundu; 1982 yılında ağabeyi tarafından banyoda yığılmış halde bulunmuş ve hastaneye götürülüp midesi yıkanmıştı. Kurtuldu. Eve geldiklerinde, babaları salonda oturmuş gazete okuyordu. Başını kaldırıp oğluna baktı. "Onun o kadar mutsuz olduğunu bilmiyordum" dedi. Sonra dönüp gazetesini okumaya devam etti. Bir ay sonra, 51 yaşında iken, gece uykusunda kalp krizinden öldü. Durumu sabah ilk fark eden oğlu olmuş ve hatırladığı kadarıyla, babasına ilk kez o zaman dokunmuştu. 'Kuantum ölümsüzlüğü'ne inanıyordu. Cesedinin çöpe atılmasını vasiyet etmişti. Ama naşı yakıldı. Eşi vasiyetini daha sonra, külleriyle yerine getirdi. Kızı 1996 yılında uyku haplarıyla bir intihar girişiminde daha bulundu. Bu sefer kurtarılamadı. Bıraktığı notta, babasıyla bir başka evrende buluşmak üzere ayrıldığını yazıyordu. Ağabeyi Los Angeles'a göç etti. Halen, Eels adlı 'rock' müziği grubunun şarkı yazarı ve solisti. 2005 yılında bestelenen 'Torunların Bilmesi Gerekenler' başlıklı şarkısının sözleri aileyi anlatıyor. Zamanından önce doğmuş dahi bir babanın dramını...

2007'nin Temmuz ayında Oxford Üniversitesi'nde, Everett'in makalesinin 50. yıl konferansı yapıldı. Yorumu 'doğru' ise, içinde seyahat etmekte olduğumuz trende yazı tura atıp da kaybettiğimiz takdirde üzülmemize gerek yok. Çünkü, tren makasa gelip ikiye ayrılmıştır ve yandaki hatta bizden giderek uzaklaşan ikincisindeki bilinç kopyamız, elindeki paraya bakıp gülümsüyordur. Henüz yanıtlanamamış olan ve sıcak bir şekilde tartışılan soru şu: Gözlemci bileşik kuantum durumundaki bir sistemle etkileştiğinde, etkileşmeye kadar tek olan evren bileşik durumun barındırdığı seçeneklerin her birine doğru dallanırken, gözlemci hangi anlamda ayrışıyor; söz konusu olasılıklara uygun şekilde kopyalanmasının fiziksel anlamı nedir?

Sahi: Fiziksel anlam neydi?...

Kaynaklar

Byrne, Peter, “The Many Worlds of Hugh Everett”, *Scientific American,* Aralık 2007, s. 98-106.

The Theory of the Universal Wavefunction, Hugh Everett III, Manuscript (1955).

PARÇACIĞI BULUN

Klasik mekanik: Klasik mekaniğin matematiği oldukça basit: Newton'un ikinci yasası. Üzerinde F kuvveti bulunan m kütleli bir parçacığın ivmesi, kuvvetin kütleye oranına eşittir (a=F/m). İvme hızın, hız da konumun zamana göre, 'türevi' de denilen değişme hızı olduğuna göre; parçacığın ivmesinden hareketle hızı, hızından hareketle de konumu hesaplanabilir. Yeter ki, başlangıç konumu ve hızı biliniyor olsun. Bu şu anlama geliyor: Diyelim t=0 anında parçacığın konumunu belirleyip hızını ölçtük. Bundan sonrası için, her an üzerine etkiyen kuvvetlerin, 'bileşkesi' de denilen vektör toplamından hareketle, parçacığın izleyeceği patika kesinlikle hesaplanabilir. Sonra hızdan hareketle, doğrusal momentumu vb. Açısal konum, hız ve ivme de, benzeri şekilde. Klasik mekanikte her şey belirlenebilir. O kadar ki, Fransız matematikçi Pierre-Simon Laplace'a göre; evreni oluşturan tüm parçacıkların şu anki konumlarıyla hızları belir-lenebilse ve evrendeki tüm kuvvetler bilinse, evrenin geçmiş ve geleceği hesaplanıp gözler önüne serilebilir. Bu, klasik mekaniğin içerdiği determinizmin aşıladığı aşırı özgüvenli ve rahat zamanlardı. Meğer öyle değilmiş...

Kuantum mekaniği: Kuantum mekaniğinin matematiği ise ilginç. Parçacığın davranışı yine bir denklem, Schrödinger denklemi tarafından belirleniyor. Denklemde, parçacığın kütle gibi özelliklerinin yanında, kuvvet yerine potansiyel var. Örneğin bir elektromanyetik alandaki elektron için elektrik alanın skaler, manyetik alanın vektör potansiyeli. Denklemin zamandan bağımsız çözümleri, söz konusu potansiyelin, parçacığın bulunmasına izin verdiği 'özgün durumları veriyor. Özgün durumlardan her biri, aslında birer olasılık dağılımı. Bu dağılımlardan herhangi birinin zamanla nasıl değiştiğini ise, Schrödinger denkleminin zamana bağlı şekli yönetiyor. Parçacık bu özgün durumlardan birinde olduğunda, fiziksel değişkenlerinin değerleri, o özgün duruma ait olasılık dağılımı tarafından belirlenmekte. Değişkenlerden, örneğin konum gibi bazıları, sürekli değerler alabiliyor –ki bu durumda, belli bir özgün durumun olasılık dağılımı, parçacığın çeşitli konumlarda bulunması olasılığını vermekte. Spin, enerji ve momentum gibi fiziksel değişkenler ise, bazen kesintili değerler almak zorunda. Örneğin bir manyetik alan içerisindeki elektronun spininin, alan yönündeki bileşeninin, sadece alana paralel ya da zıt yönde olabilmesinde olduğu gibi. Bu tür değişkenler için, özgün durumların her biri, kesin bir 'özdeğer'e sahip. Özgün durum zamanla değişiyor olsa dahi, sahip olduğu özdeğer değişmiyor. Öyle ki, örneğin elektronun manyetik alan yönündeki spin bileşenini bir kez ölçüp de 'yukarı' yönde bulmuşsak eğer, bundan sonra; elektron dış dünya ile etkileşmediği sürece; tekrar tekrar ölçtüğümüzde, spini hep 'yukarı' buluyoruz. Buraya kadar sorun yok...

Fakat parçacık bazen, özgün durumlardan birinde veya diğerinde değil de, bunların bir karışımından oluşan bir durumda bulunabiliyor. Bu durumda, parçacığın davranışını betimleyen dalga fonksiyonu; özgün durum fonksiyonlarının, katkı paylarını temsil eden katsayılarla (genlik) çarpılıp toplanmasıyla elde edilen bir 'bileşimi' şeklinde. Bu 'bileşik durum'un zamanla değişimi, yine Schrödinger denklemi tarafından belirlenmekte. Denklem doğrusal olduğundan, değişimin kuralı oldukça basit. Şöyle ki; toplam dalga fonksiyonuna katkıda bulunan özgün durum fonksiyonları tek başlarına olsalardı zamanla nasıl değişecek idiyseler, birleşimin içinde de öyle değişiyorlar; yani aralarında etkileşmiyorlar ve her an için, genlikleriyle çarpımlarının toplamı, o anki toplam dalga fonksiyonunu veriyor. Kısacası, kuantum mekaniği parçacıkların durumlarını, dalga fonksiyonu denilen matematiksel niceliklerle betimler.

NÜKLEER SİLAH NASIL YAPILIR?

Nükleer silahlar nükleer enerjinin, büyük miktarlarda ve ani denilebilecek kısa sürelerde, kontrolsüz şekilde üretimine dayalıdır. Nükleer enerjiyse çekirdek parçalanması (fisyon) ya da çekirdek birleşmesi (füzyon) yoluyla elde edilir.

Fisyon olayında, örneğin U-235 gibi bir çekirdek, nötron bombardımanına tabi tutulduğunda, bir nötron yutarak parçalanır ve 2 ya da 3 nötron çıkarır. Böyle çekirdeklerin parçalanabilir ya da 'fisil' olduğu söylenir. Açığa çıkan nötronlardan bazıları ortamın dışına kaçarak ya da ilgisiz çekirdekler tarafından yutularak "ziyan" olurken, bazıları diğer U-235 çekirdeklerine çarpıp yeni fisyonlara yol açar. Eğer bir uranyum kütlesinde ortalama olarak, fisyona yol açan her nötron başına açığa çıkan nötronların; "birden fazlası, biri ya da birden azı" tekrar fisyona yol açabiliyorsa, o uranyum kütlesinin "süperkritik, kritik ya da altkritik" olduğu söylenir. Geometrisine ve kimyasal bileşimine bağlı olarak, olası en küçük kritik kütle 7-8 kg düzeyindedir. Uygun bir şekilde hazırlanması gereken böyle bir kütlede, her fisyon bir yenisine yol açar ve zincirleme reaksiyon, aynı düzeyde devam eder. Süperkiritik bir kütledeyse, her fisyon birden fazla yenisine yol açtığından, fisyonların sayısı çığ gibi artar. Büyüyen bir zincirleme reaksiyon oluşur ve fisyon başına açığa, 200 milyon elektronvolt enerji çıkar. Kömürün yanmasından elde edilen enerjiyse, karbon atomu başına 4 elektronvolt kadar. Dolayısıyla 1 gram U-235'in fisyonu, 2,5 ton kömüre eşdeğer.

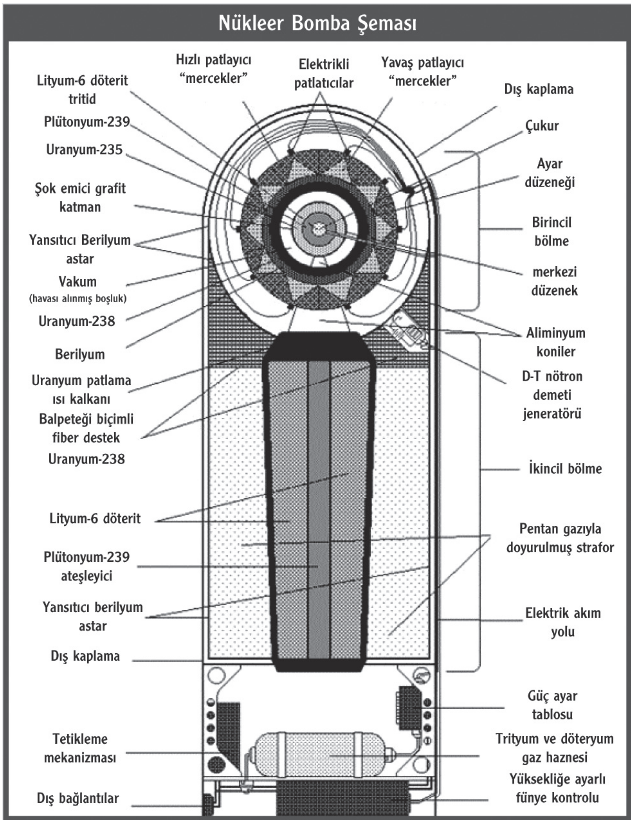
Fakat doğada bulunan uranyumun, sadece %0,71 kadarı U-235'ten, kalanıysa parçalanmayan bir izotop olan U-238'den oluşur. Dolayısıyla doğal uranyumdaki 235 bileşeninin, hele bomba yapılmak isteniyorsa %90'lar düzeyinde zenginleştirilmesi gerekiyor. Zenginleştirme yöntemlerinden birisi "gaz difüzyonu" yöntemidir. Normal şartlar altında metal olan uranyum, UF_6 gazı haline getirilir ve bir kabın, aralarında gözenekli bir zar bulunan iki bölmesinden birine konup, yüksek basınç altında sıkıştırılır. Gaz moleküllerinden U-235 içerenler, diğerlerine göre daha hafif olduklarından, herhangi bir sıcaklıkta daha hızlı hareket eder ve zarın diğer tarafına sızmakta daha başarılı olurlar. Dolayısıyla, diğer bölmedeki U-235'li molekül konsantrasyonu birazcık artar. Kayda değer bir zenginleştirme için bu sürecin binlerce kez tekrarlanması, böylesi kaplardan binlercesinin art arda kullanılması gerekir. Böyle bir tesiste, yılda tonlarca zenginleştirilmiş uranyum üretilebilir. Fakat basınçlamanın gerektirdiği güç binlerce MW, kap sisteminin tesis maliyeti milyar dolar düzeyindedir. Oysa bir nükleer bombanın yapımı için onlarca kilogram zengin uranyum gerekir. Zengin uranyumu az miktarlarda elde etmenin daha ucuz yolları vardır.

Bir başka zenginleştirme yöntemi, uranyum izotoplarının, aynı frekanstaki laser atımları karşısında verdikleri farklı tepkiye dayanır. Buysa zahmetli ve yavaş çalışan bir yöntemdir. Malzemeyi küçük miktarlarda ve yavaş yavaş elde etmenin bir diğer yolu, uranyum izotoplarını iyonlaştırıp bir manyetik alanın üzerinden geçirmek. Aynı hızla hareket etmekte olan iyonlar manyetik alandan geçerken, daha ağır olanlar daha küçük, hafif olanlarsa daha büyük yarıçaplı daireler üzerinden saptırılır ve karşıdaki bir "toplayıcı levha"nın farklı yerlerine düşerler. Bu, fakirin zenginleştirme yöntemidir. Ancak sabır gerektirir. Çünkü gün boyunca hedef levhasında, gram düzeyinde az ürün birikir.

Parçalanmaya yatkın bir diğer "fisil" çekirdekse Pu-239 izotopu. Ancak, plütonyum doğal bir element değil. Nükleer reaktörlerde, U-238 izotopunun bir nötron yuttuktan sonra bozunması sonucu oluşur. Farklı bir element olduğundan uranyumdan kimyasal yöntemlerle ayrıştırılabilir ve zenginleştirme işlemi gerektirmez. Fakat eldesi için, hazırda çalışan bir nükleer reaktörün bulunması ve yakıtına uygun zamanlamalarla müdahale edilmesi gerekir. Halbuki, bomba malzemesi olarak zenginleştirilmiş uranyum ya da plütonyum elde etmenin en kestirme yolu, bu malzemeyi, nükleer santrallere hizmet veren yakıt işleme tesislerinden almak ya da çalmak.

Fisil malzeme elde edildikten sonra bomba yapması, görece kolay bir iş. İlkel bir nükleer bomba, bir araya geldiklerinde süperkritik olacak olan iki altkritik uranyum kütlesini bir topun namlusuna yerleştirip, birini diğerine doğru ateşlemekle yapılabilir. Sonuç, büyük bir patlamaya yol açan süperkritik bir kütledir ve açığa çıkan toplam enerjiye "bombanın verimi" denir. Hiroşima'ya atılmış olan bomba böyle bir düzenekten oluşmuştur. Ancak "top tipi bomba" fazla uranyum gerektirir; hem ağır ve hantal hem de düşük verimlidir. Bir diğer yöntem; süperkritik bir fisil malzeme küresinin etrafına güçlü patlayıcılar yerleştirip, bu patlayıcıları fevkalade simetrik ve eşzamanlı biçimde patlatarak, küreyi homojen bir şekilde, çok daha süperkritik küçük bir küreye 'göçertmek'. Bu tip bir göçertme aygıtında, Pu-239 tercih edilmekle birlikte, U-235 de kullanılabilir. Yöntemin, fisil malzeme sağlamadan sonraki en zor tarafı, patlamaların eşzamanlılığını sağlayan elektronik devre elemanlarının yapımı ya da ele geçirilmesidir. Fakat zahmetine de değer: Bomba küçük, verimi yüksek olur.

Füzyon olayıysa, hidrojen ya da hidrojenin izotopları olan döteryum ve trityum çekirdeklerinin birleşmesine dayalıdır. Bu çekirdeklerin kaynaşması, birim ağırlık başına fisyondan bile daha fazla enerji açığa çıkarır. O kadar ki, 1 gram hidrojen yaklaşık 50 ton kömüre eşdeğerdir. Ancak, çekirdeklerin kaynaştırabilmeleri için, çok yüksek hızlarla çarpıştırılmaları gerekir. Yeterince yüksek sıcaklıktaki hidrojen gazında, her bir yöne doğru hareket etmekte olan atomlar, yeterince yüksek hızlarla çarpışıp kaynaşabilirler. Nitekim, güneşin merkezindeki sıcaklık 15 milyon°C'yi buluyor ve buradaki hidrojen çekirdekleri, yüksek basıncın da yardımıyla füzyona uğrayarak, güneşe ışıdığı enerjiyi sağlıyorlar. Ancak, yeryüzünde basınç çok daha düşük olduğundan, hidrojenin füzyonu için gereken sıcaklık çok daha yüksek ve 100 milyon°C'nin üstüne çıkılması gerekiyor. Bu yüzden "hidrojen bombası"nın yapımında, füzyonu biraz daha kolay olan döteryumla trityum tercih edilir. Döteryum normal sudaki hidrojen atomları arasında, 1/666 oranında bulunuyor ve fiziko-kimyasal yöntemlerle ayrıştırılabiliyor. Trityum ise, Li-6 (lityum) izotopunun nötron bombardımanına tabi tutularak, helyum ve trityuma parçalanmasıyla elde edilebilir. Ancak trityum; normal şartlar altında uçucu, kaçıcı bir gaz. Hem de, görece kısa bir yarılanma ömrüyle kendiliğinden bozunuyor. Dolayısıyla, önceden üretilip saklanması yerine, kullanımının hemen öncesinde ve sırasında üretimi tercih ediliyor. Bu amaçla döteryum lityumla karıştırılır ve her ikisi birlikte, strofor ambalaj malzemesiyle kaplanır. Patlama anı geldiğinde, lityum nötron bombardımanına tabi tutularak trityum üretilir, bu trityumlar da içerdeki döteryumlarla çarpışıp füzyona yol açacarlar. Ancak lityumun bombardımanı için nötronlar, füzyon için de yüksek sıcaklıklar gerekir. Bunlarsa 'birincil' denilen bir uranyum ya da plütonyum bombasının patlatılmasıyla elde edilir. Bu bombanın ürettiği ısınma etkisi, yani termal şok, görece yavaş yayılır ve füzyon düzeneğine ulaşana kadar, düzeneğin dağılması olasılığı belirir. Halbuki, yayınlanan gama ışınları ışık hızıyla hareket eder ve strofor bunları emerek, içindeki karışımın ısınmasını sağlar. Bir yandan da, birincil bombanın basınç şoku füzyon karışımını dışardan ve her yandan homojen bir şekilde sıkıştırır, yaydığı nötronlar lityumu parçalayıp


Nükleer Bomba Şeması
Hızlı patlayıcı "mercekler"
Elektrikli patlatıcılar
Yavaş patlayıcı "mercekler"
Lityum-6 döterit tritid
Plütonyum-239
Uranyum-235
Şok emici grafit katman
Yansıtıcı Berilyum astar
Vakum
(havası alınmış boşluk)
Uranyum-238
Berilyum
Uranyum patlama ısı kalkanı
Balpeteği biçimli fiber destek
Uranyum-238
Lityum-6 döterit
Plütonyum-239 ateşleyici
Yansıtıcı berilyum astar
Dış kaplama
Tetikleme mekanizması
Dış bağlantılar
Dış kaplama
Çukur
Ayar düzeneği
Birincil bölme
merkezi düzenek
Aliminyum koniler
D-T nötron demeti jeneratörü
İkincil bölme
Pentan gazıyla doyurulmuş strafor
Elektrik akım yolu
Güç ayar tablosu
Trityum ve döteryum gaz haznesi
Yüksekliğe ayarlı fünye kontrolu

trityum açığa çıkarırlar. Karışımın sıcaklığı 100 milyon°C'nin üstüne çıktığında, "ikincil" füzyon bombası devreye girmiştir.

Nötron bombası, küçük bir hidrojen bombasıdır. Diğer nükleer silahlardan farkı, asıl öldürücü etkisinin, yaydığı nötronların yol açtığı radyasyon hasarından kaynaklanıyor olmasıdır. Bu özelliğiyle, "güçlendirilmiş radyasyon silahı" olarak da adlandırılır. Patlamasının yol açacağı basınç ve ısı etkisi düşük olacak şekilde tasarlandığından, civardaki binalar ve sanayi tesisleri gibi fiziksel yapılar, patlamadan daha az etkilenir. Öte yandan, nötronlar fazla uzaklara yayılamadığından, bu silahın öldürücü menzili ötekilere göre kısa. Soğuk Savaş döneminde NATO kuvvetlerinin, Doğu Avrupa'daki nüfus yoğun bölgelerde savaşa hazırlıklı olma gereksinimine göre, "kısa menzilli bir antipersonel silahı" olarak üretildiler.

MANHATTAN PROJESİ

NDRC'ye bağlı olarak çalışan Uranyum Danışma Komitesi'nin adı S-1 bölümü olarak değiştirilmişti. 6 Aralık 1941 günü yapılan toplantıda, bombanın yapımı için ilk zaman çizelgesi hazırlanıp, izotop ayrıştırma araştırmalarına yönelik büyük ölçekli ilk ihaleler sonuçlandırıldı. Bundan sonraki birkaç aylık iş, dört grup arasında paylaştırılmış ve grup yöneticileri belirlenmişti. Şöyle:

1. Columbia Üniversitesi'nden Harold Urey başkanlığında; gaz difüzyonu ve santrifüj yöntemleriyle izotop ayrıştırma, ağır su incelemeleri;
2. Berkeley'den Ernest Lawrence başkanlığında, elektromanyetik yöntemle izotop ayrıştırma;
3. Chicago Üniversitesi'nden Arthur Compton başkanlığında, zincirleme reaksiyon deneyleri ve bombaya yönelik kuramsal çalışmalar;
4. Standard Oil şirketinden Eger Murphree başkanlığında, mühendislik çalışmaları.

Ertesi gün Japonya sürpriz bir saldırıyla Pearl Harbour'ı bombaladı. ABD savaştaydı.

Arthur Compton işe koyulmuştu. 1942 yılının ocak ayında Chicago Üniversitesi'nde, zincirleme nükleer reaksiyonun gerçekleştirilmesine ve ışınlanmış uranyumdan plütonyum eldesine yönelik araştırmalara bütünlük kazandırmak amacıyla, Met Lab (*Metallurgical Laboratory*) şifre adıyla bir laboratuvar kuruldu.

S-1 komitesinin program liderlerinin 23 Mayıs'ta yaptığı toplantıda, fisil malzeme üretmenin o an kabul gören beş yönteminin hepsinin paralel olarak geliştirilmesi kararı alındı. Bunlar izotop ayrıştırmada santrifüj, termal difüzyon, gaz difüzyonu ve elektromanyetik yöntemler, plütonyum üretiminde de grafit yığını ve ağır sulu reaktör tasarımlarıydı. Tahmini toplam maliyet, yarım milyar dolar olarak belirlendi.

Haziran 1942'de Vannevar Bush, Başkan Roosevelt'e sunduğu raporda, programın üretim aşamasına geldiğini ifadeyle, tesis inşaatlarını askerlerin üstlenmesini öneriyordu. 17 Haziran'da Ordu Mühendislik Birlikleri'nden (*Army Corps of Engineers*) Albay James Marshall programın başına getirildi. Marshall, Stone & Webster şirketini genel taşaron olarak seçmiş, fakat pilot süreçlerin araştırma ve geliştirilmesini OSRD'nin sorumluluğunda bırakmıştı. Bu yaklaşım çalışmayacaktı. Bir görev değişikliği de Chicago grubunda yer aldı. Compton, hızlı nötron fizyonunu inceleyen grubun başındaki Gregory Breit'i görevden alıp, yerine J. Robert Oppenheimer'ı atamıştı. Oppenheimer ertesi ay, bomba tasarımının kuramsal yönlerini tartışmak üzere Berkeley'de bir toplantı düzenler. Bu toplantıda, Richard Tolman ilk kez, fızyon bombasının "göçertme" yoluyla patlatılması fikrinden söz eder. Edward Teller ise atom bombası yerine, doğrudan hidrojen bombasının yapımını önermektedir. Savaş öncesinde Hans Bethe, Güneş'teki enerji kaynağını oluşturan termonükleer döngüyle ilgili bazı hesaplamalar yapmıştır. Edward Teller, Bethe'nin bu çalışmasından etkilenmiş olup, kendisi de bazı yeni fikirler geliştirmiştir. Daha çok bu konu tartışılır.

Halbuki proje üç aydır sürüncemededir. 17 Eylül'de yeniden yapılandırılıp, Marshall'ın yerine Albay Leslie Groves atanır. Groves, o zamanlar Dünya'nın en büyük binası olan Pentagon'un yapım projesini başarıyla yürütmüş bir askerdir. Aslında cephede görev istemiş, bu projenin sonuç vereceğine inanmadığından görevi isteksiz kabul etmiştir. Bilim insanlarına karşı otoritesini yükseltmek için generalliğe terfi ettirilir. Kendisine danışman olarak; ordu ve donanmadan birer kişi, OSRD'yi temsil sıfatıyla da Vannevar Bush olmak üzere, üç kişilik bir askerî politika komitesi oluşturulur. Askerî projeler isimlerini, yöneticisinin ait olduğu bölgeden aldığından ve Groves'un karargâhı da Manhattan'da bulunduğundan, projenin yeni adı MED (Manhattan Engineering District), kısaca Manhattan Projesi olmuştur. Groves, yeni görevinin ilk iki günü içerisinde, projeyle ilgili birkaç sorunu birden halleder...

Union Miniere adlı Belçika şirketinin, Almanların eline geçmemesi için 1940 yılında Belçika Kongosu'ndaki madeninden bir gemiye yükleyip ABD'ye yönlendirmiş olduğu ve iki yıldır 2.000 çelik bidon içinde Statten Adası'nda bekleyen 1.250 ton yüksek tenürlü uranyum cevherinin MED adına satın alınmasını onaylar. İkinci olarak, izotop zenginleştirme tesisleri için Tennessee'de geniş bir arazi satın alır. Oak Ridge laboratuvarları burada kurulacaktır. Son olarak, projeye AAA düzeyinde öncelik tanınmasını sağlamıştır.

Groves, ekim ayında Oppenheimer'la buluşup, bombanın kuramsal inceleme ve geliştirme çalışmalarının birlikte yürütülebileceği, gözden uzak, ayrı bir laboratuvarın kurulması gereği üzerinde konuşur. Aynı ay içinde, Oppenheimer'ı kurulacak laboratuvarın yöneticiliğine atar. Kasım ayında, Los Alamos'taki 'Erkekler için Çiftlik Okulu' ile civarındaki arazi, gizli laboratuvarın inşası için MED adına kamulaştırılır. Arazide yaşayan ailelere, mülklerini iki hafta içerisinde boşaltma talimatı verilmiştir. Laboratuvarların ve yüz kadar araştırmacının, aileleriyle birlikte kalabilecekleri konutların inşası başlar. Halbuki savaş bittiğinde Los Alamos'ta 6.000 kişi çalışıyor olacaktır.

Bu arada Fermi, kendisinin ikinci, ama Chicago'daki birinci grafit yığınını (Chicago Pile 1, CP-1) tamamlamak üzeredir. Mayıs ayından beri planlamakta olduğu yığın, aslında Chicago'nun 30 km kadar güneyindeki Argonne ormanında kurulacakken, inşaat işçileri kasım ayı başında greve gidince inşaat gecikmiştir. Fermi ile Compton, yığının üniversite kampusu içerisinde, Stagg Field futbol sahasının seyirci tribünleri altında kurulmasına karar verir. 16 Kasım'da işe başlanmış ve tribünlerin altında yeterli yükseklik bulunmadığından, tasarımda bazı değişiklikler yapmak zorunda kalınmıştır. Örneğin en üstteki grafit bloğu dizilerinin bir kısmından vazgeçilir. Reaktör yine de, 2 Aralık 1942 günü, 1,0006 k değeriyle kritikliği aşar. Fermi ve ekibi reaktörü 4,5 dakika süreyle çalıştırdıktan ve 0,5 watt güç düzeyine ulaştıktan sonra kapatır. İş bitmiştir. Washington'a şifreli bir telegraf çekilir: "İtalyan kaşif Yeni Dünya'ya indi. Yerliler kendisine dostça yaklaşıyor…" Yığın üç ay içinde sökülerek, Argon ormanındaki asıl yerinde, CP-2 adıyla yeniden bir araya getirilecektir.

Fermi bir milyon dolara malolan CP-1 projesiyle, aslında bombaya giden bir asfalt yol açmıştır. Doğal uranyumdan yapılma bir reaktörde plütonyum üretip bomba yapılabileceği, artık kesin gibidir. Dolayısıyla, bundan sonra karbon yavaşlatıcılı reaktör modeline ağırlık verilecektir. Ağır su çalışmaları geri plana alınmıştır. 1943'ün ocak ayında MED, plütonyum üretecek reaktörlerin inşası için Washington eyaletindeki Hanford kasabası yakınlarında geniş bir arazi alır. Üzerinde kurulacak üç reaktör ve her birine birer "yakıt ayrıştırma" tesisi için planların hazırlanmasına başlanır. Ancak bu aşamada plütonyumun özellikleri hakkında o kadar çok bilinmeyen vardır ki; Groves'un ofisi zenginleştirme işleminin hâlâ, olası tüm kanallardan sürdürülmesi kararındadır. Sadece santrifüj yöntemi, büyük miktarlarda acil gereksinime yanıt veremeyeceğinden, devre dışı bırakılır. Lewis raporu gaz difüzyonu yöntemini başa koymuş olmakla beraber, Lawrence'ın "siklotron"u ön plandadır. Lawrence, Berkeley'de geliştirilmesine çalışılan aygıt için, Kaliforniya Üniversitesi'nin tanıtımını amaçlayan bir isim önermiştir. Groves'u buna, savaş sonuna kadar gizlilik kaydıyla razı edince; bildiğimiz siklotron "kalutron" olur. Şubat ayında Oak Ridge'deki inşaata, Y-12 şifre adlı elektromanyetik ayrıştırma tesisinin temelinin atılmasıyla başlanır. Groves, daha sonra diğerlerine de yapacağı gibi; Tennessee Eastman (Kodak) firmasını, tesisin yapım ve işletmesi için, kârsız bir iş anlaşmasına razı eder. Allis-Chalmers vakum pompalarını, General Electric ve Westinghouse firmaları elektronik donanımı sağlayacaktır.

Hanford'dakilere ek olarak, Oak Ridge'de de, pilot tesis niteliğindeki bir reaktörün ve ışınlanan yakıtı işleyip içindeki plütonyumu ayrıştıracak bir tesisin kurulması planlanmıştır. Mart ayında, X-10 şifre adı verilen bu reaktöre hizmet verecek olan kimyasal 'yakıt ayrıştırma' tesisinin, Nisan ayında da reaktörün kendisinin inşaatı başlar. Aynı ay içerisinde, Los Alamos Laboratuvarı da açılmıştır.

Los Alamos'un açılmasından sonra yapılan ilk seminerler, bombanın nasıl patlatılacağı üzerinde yoğunlaştı. Bunun için; bombayı altkritik fisil kütle parçaları halinde hazırlayarak, patlatılması istendiği anda bir araya getirip, süperkritikliğini sağlamak ve bu arada, ürettiği ısıyla genleşerek dağılmaması için, sistemi bir yandan da sıkıştırmak gerekiyordu. Sıkıştırma işlemi için, iki yöntem gündemdeydi; "namlu" ve "göçertme". Namlu yönteminde; altkritik iki yarım küre hazırlanıp, birinin merkezine polonyum, diğerininkine berilyum parçaları konacaktı. Sonra; düz yüzeyleri birbirine bakacak şekilde, kapalı bir silindirin iki ucuna yerleştirilecekler ve kütlelerden biri, dışındaki konvansiyonel patlayıcının ateşlenmesi suretiyle fırlatılıp, diğeriyle birleştirilerek, toplam kütlenin süperkritik hale gelmesi sağlanacaktı. Bu arada; merkezdeki polonyumla berilyum bir araya gelmiş olacağından, polonyumun ışıdığı alfa parçacıklarının bombardımanına uğrayan berilyum, nötron üretecekti. Süperkritik kütle içerisinde, bu nötronlar nesilden nesile, yaklaşık her mikro saniyede bir, misliyle katlanarak çoğalacak ve çığ gibi büyüyerek yoğunlaşan fizyonlara yol açacaktı. Sistem dağılana kadar açığa çıkan ısı, bombanın verimiydi.

Göçertme tasarımında ise fisil kütle parçaları bir küre oluşturacak geometriye sahipti. Dışlarındaki konvansiyonel patlayıcıların ateşlenmesi sonucunda, merkezde bir araya gelip sıkışacak ve yarıçapı daha küçük, ama kütle yoğunluğu çok daha yüksek, dolayısıyla süperkritik bir küre oluşturacaktı. Merkezde yine polonyum ve berilyum... Tasarımların kuramsal incelemesi tamamlandıktan sonra, bilinen en güçlü çeliklerden bomba kapları yapılmaya ve içlerine "yalancı" bombalar konularak patlatılmaya başlandı. Çünkü kuram güven verirdi, ama uygulama kesinlik demekti. Ne de olsa beklenmedik sorunlar çıkabilirdi. Nitekim...

1943 Haziran ayında, Oak Ridge'deki K-25 gaz difüzyon tesisinin güç santralının temeli atılır. Tesisin kendisi 3.122 evreden oluşacaktır. Evrelerin boyutları 3,4x2,0 m'den başlayıp, 1,7x1,1 m'ye kadar azalmaktadır. İçlerindeki "yarı geçirgen" zar, tüpler halinde imal edilecek ve tüplerin içinden geçirilen UF_6 gazının, yol boyunca dışarı sızan kısmı zenginleşecektir. Plana göre, evrelerin tümünde 5.174.000 adet tüp vardır. Toplam uzunluk 10 bin kilometre kadardır. Santral, bu tesisin pompalama sistemlerinin güç gereksinimi içindir: 4.000 MW.

1943 Ağustos ayında, Hanford'daki ilk reaktörün soğutma suyu donanımının inşasına başlandı. Hanford reaktörleri, Fermi'nin Chicago'da kurduğu CP-1 grafit yığınına benziyordu. Ancak, CP-1'in gücü watt düzeyindeyken; bunlar plütonyumun yanında, 250 MW'lık da güç üretecekti. Bu yüzden soğutulmaları lazımdı. Dolayısıyla, grafit yığınının içinde, uranyum yakıt kanallarından başka, soğutma suyu kanalları da vardı. Reaktörlerin yapımını Du Pont üstlenmişti.

Eylül ayında ise, Oak Ridge'deki gaz difüzyon tesisinin temeli atılır. Üstlenici, Union Carbide firmasıdır. Fakat difüzyon zarı için uygun bir tasarım, hâlâ ortada yoktur. Çünkü zarın gözenekleri homojen ve boyutça 10^{-6} cm düzeyinde olmak, ama buna karşın, safsızlık biriktirip tıkanmamak zorundadır. Ayrıca, aşırı paslandırıcı olduğu ortaya çıkan UF6 gazının, yüksek basıncına ve kimyasal saldırısına karşı dayanıklı olması lazımdır. Diğerleri havlu atınca, geliştirme çalışmalarını sürdüren, sadece Houdeille-Hershey firması kalmıştır. Ekim ayında, Hanford'daki ilk reaktörün soğutma suyu donanımı tamamlanır. Kendisinin de inşaatına başlanır.

Kasım ayı geldiğinde, Oak Ridge'deki X-10 reaktörü kritik hale geçer. Kenar uzunluğu 7,5 m olan küp şeklindeki bir grafit yığını reaktörde, 20 cm'lik aralıklarla yerleştirilmiş 1.248 kanal bulunmaktadır. Y-12 elektromanyetik ayrıştırma tesisinde ise elektromıknatısların temininde sıkıntı yaşanıyordu. Çünkü kimsenin aklına, mıknatıs sarımları için ne kadar bakır harcanacağını ve nereden sağlanacağını hesaplamak gelmemişti. Bakır kıt olduğundan bulunamıyordu. Gerçi gümüş de aynı işi yapardı. Ama gereken miktarı sadece bir yerde vardı. Sorun; Groves'un girişimiyle Amerikan Hazinesi'nden, 300 milyon dolar değerinde 15.000 ton gümüş ödünç alınarak aşılır.

Y-12'deki "alfa" dizisi kalutronlar nihayet çalıştırıldığında yer yerinden oynamıştı. Güçlü manyetik alanların etkisiyle; metal tanklar kayıyor, ek ve kaynak yerlerinden çatlayıp sızdırıyordu. Soğutma yağlarına pas karışan mıknatıs sarımları kısa devre yapmaya başlamıştı. Tesis, bir bakım onarım kâbusuna dönüştü. Kullanılan süreçlerin daha önce bir pilot tesiste denenmemiş olmasından kaynaklanan tüm sorunlar yaşanıyordu. Diğer tesislerde de olduğu ve olacağı gibi... Bir olumlu gelişme; inşaatı ilerlemekte olan gaz difüzyon tesisi için, Ocak 1944'te nihayet, zar malzemesinin seçilmiş olmasıydı. Sinterlenmiş nikel tozundan oluşan...

Şubat 1944'te, Oak Ridge'deki Y-12 tesisinin alfa dizisinde üretilen ilk zengin uranyum örneği, Los Alamos'a ulaşmıştır. Zenginleştirme oranı düşük olup, %12'dir. Tesis tamamlandığında; 20 futbol sahasını kaplayan irili ufaklı 268 binadan oluşacak ve 500 milyon dolara mal olacaktır. İki yıl sonra da K-25 gaz difüzyon tesisi tümüyle devreye girdiğinde kapatılacaktı...

Nisan 1944'te Oak Ridge'de, K-27 şifre adlı ikinci gaz difüzyon tesisinin temeli atılır. Savaş bittiğinde devreye girecek, girdiği zaman da tüm diğer zenginleştirme süreçlerini çağdışı bırakarak, 20 yıl süreyle hatasız çalışacaktır. Nisan ayında, plütonyum üretimi başlar. Oak Ridge'deki X-10 reaktörünün ürettiği ilk, gram düzeyindeki örnekler Los Alamos'a ulaşır. Bu örnekler üzerinde yapılan analizler, bomba yapımına yol göstermektedir...

Gerçi, namlu sistemi üzerinde yapılan denemeler yolunda gitmiştir. Fakat plütonyum örneklerin üzerinde çalışmakta olan Emilio Segre, yaz başında; bu örneklerin 239 yanında 240 izotopu da içerdiğini fark eder. Bu yeni izotopun hızlı nötronlar karşısında fizyona uğrama eğilimi, yüksek çıkmıştır. Bu durumda, namlu sistemi kullanılıyorsa eğer, yarımküreler birbirine yaklaşırken, nötron nüfusu arttıkça Pu-240 izotopu erken fizyonlara yol açacak ve kütleler erkenden ısınmaya başlayacaktır. Yani patlayıcının şok dalgası parçaları birbirine yaklaştırmaya, ısıl genleşme ise ayırmaya çıkacaktır. Bombanın, az biraz enerji ürettikten sonra, "tıs"layarak (*fizzle*) dağılacağı kesin gibidir. Segre, Los Alamos ekibine, namlu sisteminin plütonyum bombası için çalışmayacağını bildirir. Nitekim, yapılan hesaplar; fırlatma hızı saniyede 1 km olsa dahi, iki yarımkürenin birbirini kucaklayıp, yeterince uzun süreyle bir arada kalamayacağını göstermiştir. Bu durumda, plütonyum bombasının namlu yöntemiyle patlatılması mümkün değildir. Halbuki, plütonyum üretimi hız kazanmak üzeredir. Uranyum zenginleştirmesi ise yavaş gitmektedir. "İyi ki" bombayı patlatmak için bir diğer “göçertme” yöntemi daha vardır. Onda da sorun çıkar...

Deneyler sırasında; küresel yüzey üzerindeki patlayıcılar ateşlendiklerinde, her biri ayrı ayrı, merkeze doğru yayılan birer küresel şok dalgası üretiyordu. Bu dalgaların üstüste bindiği yerlerdeki basınç, civar bölgelere göre misliyle artıyor ve basıncın görece düşük olduğu bölgelerdeki malzemeyi sıkıştırıp, jetler halinde dışarı fışkırtıyordu. Patlayıcıların öyle tasarımlanıp patlatılması lazımdı ki; ürettikleri şok dalgaları, fisil kürenin merkezine doğru yakınsayan tek ve düzgün bir küresel yüzey oluşturabilsin. Fizikçi Seth Neddermeyer ile Macar asıllı matematikçi John von Neumann, James Tuck’un bir önerisinden yola çıkarak, bu zor problem üzerinde çalışmaya başladılar. Bir yandan da reaktörlerde üretilen plütonyumda, 240 izotopunun fazlaca oluşmasına imkân vermemek lazımdı. Bunun için; uranyum çubuklarını reaktörün içinde fazla uzun süreyle tutmadan çıkartıp, plütonyumunu ayrıştırdıktan sonra, tekrar yakıt çubuğu haline getirip kullanmak gerekiyordu. Bu “yakıt işleme” süreciydi ve zaten yapılıyordu; ancak sıklaştırılması gerekti. Bu da plütonyum üretiminde yavaşlama demekti. Gerçi birden fazla reaktörle yola çıkılmıştı, iyi ki de... Ama uranyum cephesinde de, Y-12 elektromanyetik ayrıştırma tesisinde, beta serisi kalutronlar hâlâ devreye girememişti. Halbuki, alfa dizisinin ürettiği %12’lik uranyumu, bombanın gerektirdiği %80 zenginlik oranına yükseltecek olan bunlardı... Gaz difüzyonu tesisinde keza gecikmeler yaşanıyordu. Dolayısıyla, Oak Ridge’deki S-50 termal difüzyon tesisinin yapımına acilen başlandı.

Termal difüzyon tesisi, S-50 şifre adıyla, projenin başlarında tasarımlanmıştı. Tasarıma göre süreç, iç içe iki boru şeklindeki sütunlarda gerçekleştirilecekti. İki boru arasından UF_6 gazı geçirilecek ve geçerken, iç borunun içinden geçirilen sıcak buharla ısıtılacaktı. Gazın sıcak iç yüzeyden, daha soğuk olan dış yüzeye doğru difüzyonu sırasında, daha hafif olan U-235 izotopunu içeren mollekküller daha hızlı hareket ettiklerinden, dış yüzeye ulaşan gaz, görece zenginleşmiş olacaktı. Fakat uranyumu bu yöntemle bomba düzeyine zenginleştirmenin verimli olmadığı anlaşılınca yapımından vazgeçilmişti. Y-12 ve gaz difüzyonu tesislerindeki gecikmeler karşısında, Philip Abelson, doğal uranyumun termal difüzyonla biraz, %0,71’den %0,89 düzeyine zenginleştirilmesini, sonra da bu hafif zengin uranyumun, Y-12 için girdi olarak kullanılmasını önerdi. Böylelikle, Y-12’nin çıktı hızı artırılarak gecikmeler kısmen telafi edilmiş olacaktı. Planlanan tesis, her biri 15 m yüksekliğindeki, nikel-bakır alaşımından yapılma, çift duvarlı borulardan oluşan 2.100 adet termal sütun öngörüyordu. Groves, projeyi 90 gün içerisinde tamamlaması şartıyla H.K. Ferguson firmasına verdi. Kârsız olarak, diğerleri gibi...

Ağustos 1944'te, Los Alamos yeniden yapılandırıldı. Uranyum bombası küçük bir grup tarafından tamamlanacak ve ağırlıklı olarak plütonyum bombası için göçertme yöntemi üzerinde yoğunlaşılacaktı. Konvansiyonel patlayıcıların ateşlenmesi sonrasında oluşan yerel basınç zirvelerini önlemek ve merkeze yakınsayan küresel bir basınç dalgası elde etmek için, değişik güçlerde patlayıcıların kullanılması gerekiyordu. Patlayıcı gücünü değiştirmek, yoğunluğunu değiştirmekle mümkündü. Ancak daha önce yüksek güçlü patlayıcılarla bu şekilde çalışılmadığından, sorun sanıldığından da çetin çıktı. Farklı güçteki patlayıcıların katmanlar halinde sıralanması ve böylelikle, oluşacak şok dalgalarının seyahat hızlarının, geometrik konuma bağlı olarak ayarlanması gerekti. Son tasarıma göre; toplam 2,5 ton ağırlığındaki patlayıcılar, "patlayıcı merceği" denilen 32 katman halinde kullanılacaktı. Bunların uygun zamanlamalarla ve milyonda bir saniye düzeyinde duyarlılıkla patlatılması gerekiyordu. Bu işi yapacak elektronik aksamın da yapılması... Öte yandan merkezdeki fitili oluşturan polonyumla berilyumu, patlama anına kadar birbirinden uzak tutmak lazımdı. Halbuki namlu yönteminde buna imkân tanıyan mesafeler, bu geometride yoktu. Sonuç olarak; fitil malzemesi yanyana yerleştirilip, aralarına altın ve nikel folyolar kondu. Böylelikle, polonyumun yaydığı alfa parçacıkları, ta ki dıştaki patlayıcılar ateşlenip de her şey birbirine karışıncaya kadar; berilyuma nüfuz edemeyecekti...

14 Eylül 1944'te, termal difüzyon tesisi S-50'nin inşaatına başlanmasından 69 gün sonra, sütunlarından 320'si devreye girmiştir. S-50, savaş sonuna kadar çalıştırılacak, gaz difüzyon tesisinin tümüyle devreye girmesinden sonra kapatılacaktır.

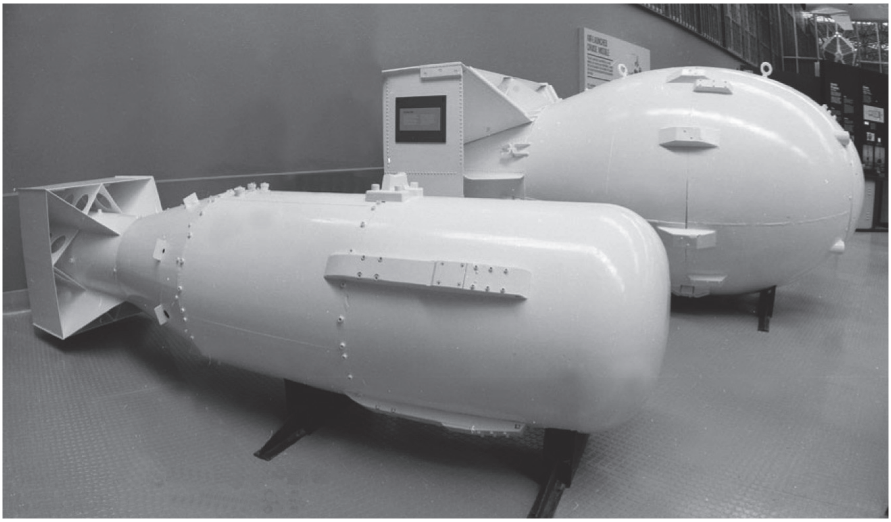
Eylül ayı içinde Los Alamos'a %63 zenginleştirilmiş uranyumun ilk kilogramı ulaşır. Bomba tasarımları tamamlanmıştır. Frisch ve Peierls'in 1 kg'lık kritik kütle öngörüsünün aşırı iyimser olduğu anlaşılmıştı. Yapılan hesaplara göre, %80 zenginleştirilmiş uranyum için kritik kütle 56 kg'dır; 11,5 cm çapında bir küre. Plütonyum için bu değerler 11 kg ve 8 cm'dir. Tabii, enerji çıktısını yükseltmek için bundan da fazla fisil malzeme kullanmak lazımdır. Halbuki uranyum üretimi yavaş gitmekte, hızlandırılması riskli görünmektedir. Kritik kütle miktarlarını azaltmanın yolları aranıp bulunur. Fisil malzemenin etrafı, kalın bir doğal uranyum kabuğuyla çevrelendiği takdirde, bu kabuk; fisil malzemeyi patlama sırasında saniyenin kesri kadar daha uzun süreyle bir arada tuttuğu gibi, dışarıya kaçan nötronların sayısını da azaltmaktadır. Dolayısıyla, hem, zincirleme reaksiyon daha uzun sürecek, hem de geri yansıtılan nötronlar ek fizyonlara yol açarak, kritiklik için gereken fisil malzeme miktarını azaltacaktır. Miktarlar; uranyum için 15, plütonyum için 5 kg düzeyine kadar iner. Uranyum bombasına "Little Boy" (küçük oğlan) adı verilir. Plütonyum bombasına da, "Fat Man" (şişko adam)...

Yine eylül içerisinde, Hanford'un üç reaktöründen ilki kritik hale gelir. Fakat tam güce ulaştıktan saatler sonra, kendi kendine kapanır. Birkaç saat sonra tekrar kritik hale geçmiş, 12 saat sonra yine kapanmıştır. Anlaşılan; reaktörün etkin çoğalma faktörü k, periyodik salınımlar sergilemekte ve kah 1'in üstüne çıkıp, kah altına inmektedir. Bu sorunun kaynağını, Wheeler'la Fermi belirler. Fizyon ürünlerinden bazılarının nötron yutma eğilimi yüksektir. Reaktör kritik hale getirilip de çalışmaya başlayınca, bu ürünler zamanla birikerek, k'yı 1'in altına indirip, kapanmaya neden olmaktadır. Öte yandan, aynı ürünler saat düzeyinde kısa yarı ömre sahiptirler. Reaktörün kapanmasından sonra bozunarak yok olduklarından ve yenileri de artık oluşamadığından; k tekrar 1'in üstüne çıkıp reaktör çalışmaya başlamaktadır. Çözüm; reaktördeki uranyum yakıt stoğunu artırarak, salınan k'nın minimum değerini 1'in üstüne çıkarmaktır. Ama reaktör bir kez inşa edilmiş olduktan sonra?...

Wheeler bazı sorunların doğabileceğini, reaktör daha tasarım aşamasındayken öngörmüştü. Hatta reaktörü inşa eden Du Pont mühendislerinden, planlarda belirtilen 1.500'e ek olarak, 504 yakıt kanalının daha açılmasını istemişti. Onun bu isteği, reaktörün inşası geciktirip, maliyetini milyonlarca dolar artırdığından şimşekleri de üzerine çekmişti. Halbuki şimdi, reaktörü onun bu müdahalesi kurtaracaktı. Boş kanallardan bazılarına yakıt takviyesi yapılmaya, bazılarının da soğutma suyu sistemine bağlanmasına başlandı.

17 Aralık 1944'te, bombayı hedefe taşıma kapasitesine sahip, 509. Karma Grup (*Composit Group*) adıyla bir hava filosu oluşturulur. Grup; Wendover Field, Utah'ta üslenmiş olup, amaca uygun olarak değiştirilmiş 15 adet B-29 bombardıman uçağından oluşmaktadır. Yılın son ayında ayrıca, Hanford'daki reaktörlerden ikincisi de plütonyum üretimine başlar.

Ocak 1945'te, Oak Ridge'deki K-25 gaz difüzyon tesisinin ilk aşaması devreye girer. K-25'in 4 katlı, 800 m uzunluğundaki binası, 200.000 m^2'ye alana yayılmış olup, zamanının en büyük binasıdır.



Hiroşima'ya atılan Little Boy (solda) ve Nagasaki'ye atılan Fat Man (sağda).

Tam otomasyona sahip olmasına karşın, üç vardiya halinde görev yapan 9.000 çalışanı vardır. Evrelerinin henüz hepsi devreye girmemiş olduğundan, üretebildiği en yüksek zenginleştirme oranı %20 kadardır. Bu haliyle ancak Y-12'ye girdi üretebilecektir. Son evreleri savaş biterken devreye girecek ve toplam maliyeti 500 bin doları aşacaktır. İşletmeye alınır alınmaz, küçük ama zor bir sorun çıkar. UF_6 gazı, sızdırmazlık sağlayan contaların yağına saldırmaktadır. Gaz sızdırmayan ve yağ kullanmayan yeni bir contanın geliştirilmesi gerekir; 'teflon,' evlerimize giren…

Mart 1945'te; Oak Ridge'deki S-50 termal difüzyon tesisi, 2.100 sütununun tümüyle faaliyete geçmiştir. Y-12 tesisi, bir "işletme kâbusu" olmaktan çıkarılmıştır. Los Alamos'a düzenli olarak her hafta %89 zenginleştirilmiş uranyum kolileri iletilmektedir. Toplam teslimat hacmi temmuza kadar 50, kasıma kadar da 100 kg'ı bulacak gibidir. İki "Little Boy"a yetecek kadar…

1945 Nisan ayında, Hanford'daki plütonyum üretimi tam kapasiteyle devreye girer. Üç reaktörle, üç kimyasal ayrıştırma tesisi senkronize çalışmaktadır. Tam otomasyonlu ve uzaktan kumandalı ayrıştırma tesislerinde, ABD'deki ilk televizyon aygıtları kullanılmıştır. Tesisten çıkan radyoaktif atıklar için, yeraltında 16 adet depo vardır. Yıl sonuna kadar 120 kg'lık üretim beklenmektedir. 19 "Fat Man"e yetecek kadar…

Nisan ayında, Başkan Roosevelt ölmüştür. Yerine yardımcısı Harry S. Truman geçecektir. Başkanlık Yemini ettirildikten sonra, kendisine Manhattan Projesi hakkında ilk kez bilgi verilir. Einstein, projede görev almamış olmakla beraber, önemli gelişmelerinden haberdardır. Başkan Roosevelt'e ikinci bir mektup yazarak, bombanın savaşta kullanılmamasını, yalnızca bir tehdit olarak sunulmasını istemiştir. Ancak görev değişimi sırasındaki karmaşa nedeniyle, mektup yeni Başkan'ın eline geçmez. Bu sırada, Avrupa'daki savaş artık sona ermek üzeredir. Almanların 1.200 tonluk uranyum cevheri stoğu ele geçirilip, ABD'ye getirilir. Bomba yapımına yöneltilecektir.

Haziran 1945'te; Wendover Field, Utah'taki 509. Karma Grup, Pasifik'teki Tinian Adası'na kaydırılmıştır. Tokyo'dan yalnızca 2.300 km mesafeye. Temmuz ayında Los Alamos'ta, 50 kg zenginleştirilmiş uranyum birikmiştir. 'Little Boy'a yetecek kadar. Uranyum bombasının, basit "namlu tasarımı"yla çalışacağından hemen herkes emindir. Fakat plütonyum bombasının karmaşık "göçertme" tasarımına güven daha azdır. Los Alamos ekibi bu bombanın, kullanılmadan önce denenmesini istemektedir. Groves önce bu fikre karşı çıkar. Çünkü, konvansiyonel patlamanın ardından bombanın çalışmaması halinde, onca zahmetle üretilmiş olan plütonyum çöle dağılacaktır; ara da bul, topla dur. Fakat sonra kabul eder. Çünkü, Japonya'nın fızyon üzerinde çalıştığı bilinmektedir ve atıldığında patlamadığı takdirde, düşmana bir bomba hediye edilmiş olacaktır. İkinci bir 'Fat Man'ın plütonyumu nasılsa yoldadır. Deneme kararı alınır...

Bomba New Mexico çölünde, 30 m yüksekliğindeki bir kulenin tepesine yerleştirilip, 16 Temmuz sabahı 5:29'da uzaktan kumandayla ateşlenir. Patlamanın şiddeti, beklenenden fazladır. Olayı bir siperin arkasından izlemekte olan Fermi, şok dalgasının kendisine kadar ilettiği rüzgâra bıraktığı bir kâğıt parçasının uçuş hızından hareketle bomba verimini kabaca hesaplarken, daha uzaklardan koruyucu gözlüklerle ilk "mantar"ı izlemekte olanlardan genç bir bilim adamı arkadaşına şunu söylemektedir: "Tarihin gözünde hepimiz ... çocukları olduk..." Denemeye verilen ad "Trinity"dir, Teslis...

Bu arada Fat Man ve Little Boy, parçalar halinde, gemi ve uçaklarla Tinian Adası'na nakledilmiştir. Los Alamos'tan gelen bir ekip tarafından monte edilirler. Projede çalışanların bir kısmı, yaptıkları bombanın kullanılmaması için aralarında imza toplamaktadır. Los Alamos'u başarıyla yöneten Oppenheimer da aralarındadır. Hiç değilse okyanus üzerinde, sahile yakın bir yerde patlatılarak, düşmanın uyarılmasını önerirler. Fakat Truman, Hiroşima ve Nagasaki'ye karşı kullanılmalarına karar verecek, Einstein sonradan basına yansıyan görüntülere bakarken, "keşke o ilk mektubu yazan parmaklarımı yakmış olsaydım" diyecektir. Sonuç?...

Little Boy'un içerdiği uranyum, ortalama %80 zenginlikte, 64 kilogramdı. 6 Ağustos 1945 sabahı, Enola Gay adlı uçaktan bırakıldı. Saat 8:16'da 580 metre yükseklikte patlatıldı. Uranyumun yalnızca %2'si fızyona uğradı. Verimi 15 kiloton TNT eşdeğeri kadardı. Hiroşima'da 330.000 insan yaşıyordu. 70.000'i anında öldü. 70.000'i de yıl sonuna kadar...

Fat Man'in içerdiği plütonyum sadece 6,2 kilogramdı. 9 Ağustos 1945 günü öğlene doğru, Bock's Car adlı uçaktan bırakıldı. Saat ll:02'de, 500 metre yükseklikte patlatıldı. Plütonyumun yalnızca, %20 'si fizyona uğradı. Verimi 22 kiloton TNT eşdeğeri kadardı. Asıl hedef Kokura Arsenali'ydi. Bulutlu hava nedeniyle kaçırılmıştı. Nagasaki'de 200.000 insan yaşıyordu. 40.000'i anında öldü. 30.000'i de yıl sonuna kadar...

Beş gün sonra Japonya teslim olur. II. Dünya Savaşı sona ermiştir. Manhattan Projesi de...

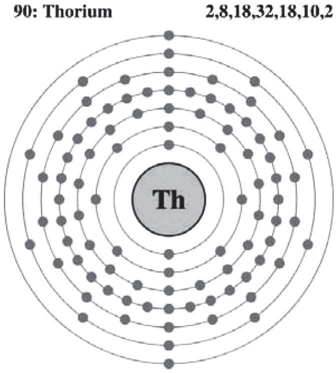
TORYUM DOSYASI

Toryum bazen, çok değerli bir kaynakmış gibi tartışılıyor. Halen öyle değil. Kullanımı sınırlı. Yan ürün olarak ele geçen üretiminin fazlası, düşük düzeyli atık olarak gömülüyor. İleride öyle olabilir. Nükleer enerji kaynağı olarak uranyumun yerini alabilir. Ne de olsa metal üreticileri bir zamanlar uranyumu da, Manhattan Projesi öncesinde, karşılaştıklarında atıyorlardı. Gerçekçi bir değerlendirme için, henüz emeklemeye çalışan toryumun yakıt döngüsünün, halen kral olan uranyumun döngüsüyle, kısmi de olsa bir kıyaslamasını yapmakta yarar var.

Toryum elementi: Toryum, doğadaki uranyumdan sonra 'atom numarası', yani proton sayısı en yüksek (90) ikinci element. Aktinit serisinin ikinci elemanı. Kütle yoğunluğu oda sıcaklığında 11,7 g/cm^3. Bundan 6,6 milyar yıl kadar önce, daha sonra Güneş sisteminin oluşmasına vücut vermiş olan birden fazla süpernova patlamasında oluşmuş. Çekirdeği, o güçlü patlamaların zerk ettiği potansiyel enerjiyle dolu. Yerkabuğunda yaygın şekilde, genel olarak uranyum ve diğer 'nadir toprak metalleri'yle birlikte; fosfatlar, silikatlar, karbonatlar ve oksitler halinde, kütlece ortalama milyonda 10 oranında var. Daha çok monazit ve torit minerallerinde bulunuyor. Bileşiminde 'toryum fosfat difosfat' ($Th_4(P0_4)4P_20_7$) olarak yer aldığı monazit mineralinde bolluk oranı %12'ye kadar ulaşıyor; ortalama %6 ila %7. Uranyumdan farklı olarak, yeryüzü koşullarında suda çözünmediğinden doğal sularda çok az. Buna rağmen, yerkabuğundaki bolluk oranının uranyumun üç misli, kurşun veya molibden kadar olduğu sanılmakta.

Belirlenmiş, kütle numarası 210 ile 236 arasında değişen 27 izotopu var. Hepsi de kararsız. En yavaş bozunanı, alfa ışıyan Th-232. Neredeyse kararlı olan bu izotopun yarılanma ömrü, dünyanın yaşının üç misline yakın; 14,05 milyar yıl. Toryum-230'un 75.380, Th-229'un 7.340, Th-228'in 1,92 yıl yarılanma ömrü var. Diğer izotopların yarılanma ömrü 30 günden az ve çoğununki 10 dakikadan kısa.

Doğadaki toryumun hemen tamamı Th-232'den oluşuyor. İçeriğinde Th-231 ve Th-234 de eser miktarlarda, başka çekirdeklerin bozunma ürünü olarak var. Elementin diğer izotopları yapay. Bunlardan Th-229 ilginç bir şekilde, temel enerji durumunun sadece 3,6 eV



üzerinde ‘orta kararlı’ (*metastable*) bir izomere sahip. Th-232’nin bozunma zinciri, doğadaki üç ana radyoaktivite zincirinden birini oluşturuyor ve 6 alfa, 4 beta bozunmasından geçtikten sonra kurşunun kararlı izotopu olan $_{82}Pb^{208}$ ile son buluyor. Arada oluşan $_{86}Rn^{220}$, bir alfa ışıyıcısı olup, radyasyon riski oluşturmakta. Bu yüzden toryumun depolandığı veya işlendiği yerlerin iyi havalandırılması gerekiyor. Büyük bir kısmı uranyumla birlikte Dünya’nın çekirdeğine çökmüş durumda ve bu iki elementin bozunma ısısı, çekirdeğin dış kısmındaki konveksiyon akımlarını ayakta tutarak, yerkabuğunu oluşturan plakaların tektonik hareketliliğinin devamını sağlıyor. Uranyumun suda bir miktar çözünmesi, canlı organizmalar tarafından alınmasına, toryumun çözünmemesi ise alınamamasına yol açıyor. Dolayısıyla, canlı organizmaların bünyesindeki toryum sadece, doğal uranyumun sayıca %0,0054 kadarını oluşturan U-234 izotoplarının 245.000 yıl yarılanma ömrüyle Th-230’a bozunmasından kaynaklanmakta. Bu durum, ‘uranyum-toryum yaş tayini’ yöntemiyle canlı organizma kalıntılarının, örneğin hominid fosillerinin yaş tayinini mümkün kılıyor.

Element olarak ilk kez 1828 yılında, İsveçli kimyacı Jon Jakobs Berzelius tarafından ayrıştırıldı ve Kuzey’in gökgürültüsü tanrısı Thor’a atfen adlandırıldı. 1842°C’de eriyip, 4788°C’de kaynıyor ve elementler arasında, 2946 K ile en geniş sıvı sıcaklık aralığına sahip. Saf halde iken, gümüş parlağı beyaz bir metal. Parlaklığını birkaç ay koruyabiliyor ve oksitleyici ortamda grileşip, sonunda siyahlaşıyor. Talaşı veya tozu, havada kendiliğinden tutuşabilmekte (*pyrophoric*). Diğer metallerin çoğunda olduğu gibi; ısıtıldığında alev alıp, parlak beyaz bir ışık yayarak yanıyor. Oksiti ($Th0_2$) ise 3300°C ile, oksitlerin arasındaki en yüksek ergime sıcaklığına sahip. Yalnızca tungsten gibi birkaç elementin ve tantalkarbid gibi az sayıda bileşenin ergime sıcaklığı daha yüksek. Kimyasal açıdan da çok kararlı bir bileşik olan toryum oksitin bir diğer önemli özelliği, ısıtılıp akkor haline getirildiğinde, siyah cisim ışıma spektrumundan beklenene oranla; kırmızıaltı bölgede daha az, görünür ışık aralığında ise daha yoğun bir ışıma sergilemesi. Dolayısıyla, aydınlatmada kullanılan diğer akkor malzemelere göre, enerji açısından daha verimli. Bu özelliği nedeniyle, 1885 yılında gazlı fenerlerin keşfinden sonra, nitrat hali, lüks lambaları için gömlek yapımında kullanılmaya başlandı. 1900'lü yılların başlarında elektrikle aydınlatma yaygınlaşana kadar da sokak aydınlatmasında önemini korudu. Ancak, ikincil bozunma ürünleri arasında aktinyum ve radon gazı bulunduğundan, toryum gömlekler sağlık güvenliği açısından riskli. Gerçi ışıdığı alfa parçacıkları deriden öteye geçemiyor. Fakat gömlekten kopan parçaların solunum veya sindirim yoluyla alınması halinde, alfa ışınımı akciğerlere ve iç organlara nüfuz ederek; akciğer, pankreas ve kan kanseri, karaciğer hastalığı risklerinin artmasına yol açabiliyor. Öte yandan, elementin bilindiği kadarıyla herhangi bir biyolojik işlevi yok. Dolayısıyla, özellikle imalatında çalışanların sağlık güvenliğine yönelik radyoaktivite riski nedeniyle, aydınlatma alanında artık, daha az verimli veya daha pahalı olmalarına rağmen, itrium veya bazen zirkonyum gibi alternatifleri kullanılıyor.

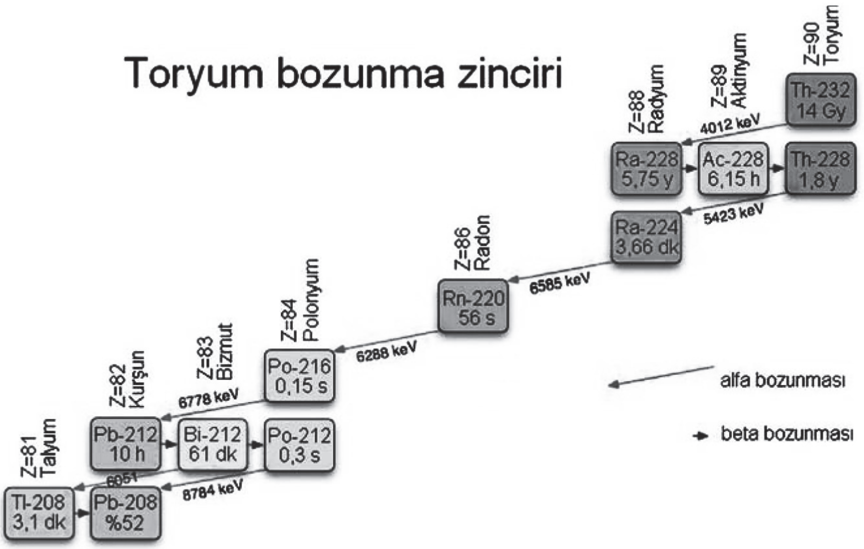
Toryum oksitin diğer kullanım alanları da var. Tungsten gaz kaynağı elektrotlarının bileşiminde, elektrik ampullerinde kullanılan tungstenin dane iriliğinin kontrolünde ve yüksek ergime sıcaklığı nedeniyle de, ısıya dayanıklı seramiklerin yapımında kullanılıyor. Cama katıldığında yüksek kırılma indisine ve düşük ayrışmaya yol açtığından, kameralar ve bilimsel aygıtlar için yüksek kaliteli mercek yapımında; sülfürik asit üretimi, amonyağın nitrik asite dönüştürülmesi ve petrolün ayrıştırılması işlemlerinde katalizör olarak kullanılmakta.

Öte yandan, toryumun metal hali, yüzeyinden bir elektronun salınmasını sağlamak için harcanması gereken enerji (iş fonksiyonu) düşük olduğundan, yüksek elektron ışıma gücüne sahip. Bu özelliği nedeniyle, ark ışını lambalarında, ısıtıldığında elektron (termiyonik) yayan katot uçların ve elektronik donanımda kullanılan tungsten tellerin kaplanmasında kullanılıyor. Uçak motorlarının yapımında kullanılan magnezyum alaşımlarına, yüksek sıcaklıklarda sertlik ve sünmeye karşı dayanıklılığı sağlamak amacıyla katılıyor.

Toryum genellikle monazit mineralinden elde edilmekte. Monazit ise, esas olarak, ağır elementler içeren kumların; titanyum, zirkonyum ve kalay gibi elementlerin üretimi amacıyla işlenmesi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan bir mineral. En büyük üreticileri Brezilya, Hindistan ve Malezya. Monazit aynı zamanda, seryum ve lantan gibi 'nadir toprak metalleri' için önemli bir cevher. Zaten esas olarak, bu elementlerin eldesi için işleniyor ve sonuçta, toryum bir yan ürün olarak ele geçiyor. Kısacası toryum, bir yan ürünün yan ürünü konumunda. Katalizör olarak kullanımı tekrarlı, diğer alanlardaki tüketiminin ise hacmi sınırlı. Öte yandan, doğal aktivitesi nedeniyle, özellikle seramik yapımında ve lüks gömleği imalatında alternatiflerine doğru bir yöneliş var. Dolayısıyla, yan ürün olarak elde edildiği hızda tüketilemiyor. Biriken miktarının düşük düzeyli atık olarak saklanması lazım. Bunun çevresel gereklerini yerine getirmek pahalı olduğundan, üreticiler için bir sıkıntı kaynağı. Dünyada halen yılda 6.000 ton kadar monazit cevheri işlenerek, 300 ton kadar toryum üretiliyor. ABD'deki yıllık tüketimi 10 tondan az. Oksidinin fiyatı saflık derecesine bağlı ve 2006 sonu itibariyle; %99,9 için 80, %99,99 için 100 dolar/kg düzeyinde. Lüks gömleği kalitesindeki nitratı ise, 27 dolar/kg. Fazla kullanılan bir metal olmadığından, dünyadaki rezervlerinin belirlemesine yönelik kapsamlı aramalar yapılmış değil. Bu yüzden, değişik kaynakların belirttiği ülke rezervleri arasında ciddi farkılıklar var.

Halbuki toryumun nükleer enerji üretiminde kullanılması mümkün...

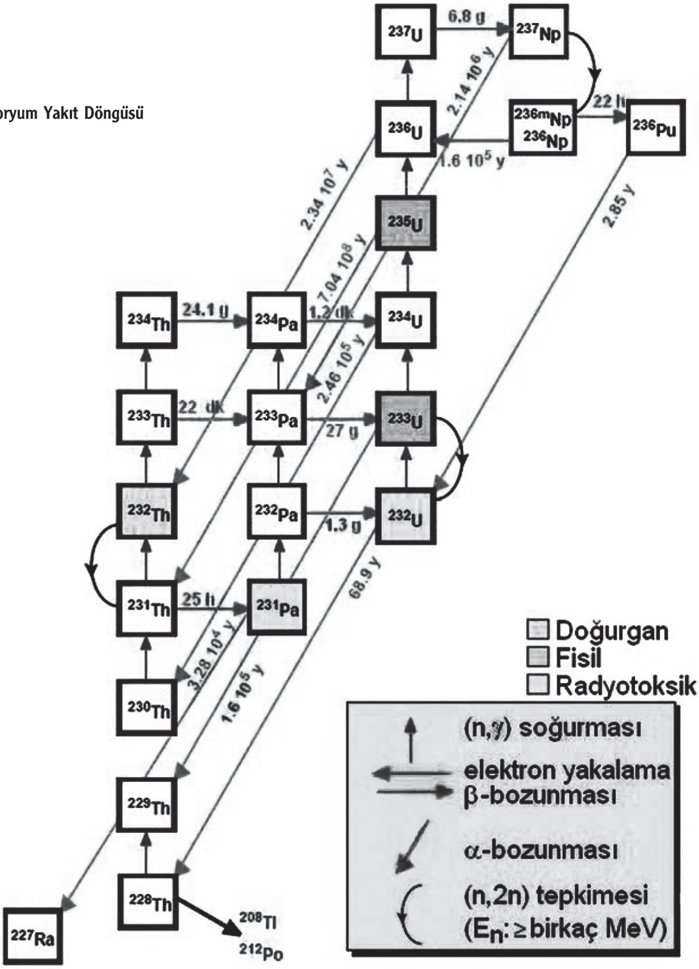
Toryum reaktörü: Genelde aktinitler serisinin tüm diğer üyeleri gibi toryum da, yüksek enerjili nötronların isabetiyle parçalanabilir. Fakat, yavaş nötronlarla parçalanamadığından, fisil değildir. Yavaş bir nötron yuttuğunda, Th-233 oluşturur. Bu çekirdek, nötron sayısı fazla geldiğinden, kararsızdır. Nötronlarından biri elektron (β^-) ışıyarak protona, dolayısıyla çekirdeğin kendisi, 23 dakikalık yarılanma ömrüyle protaktinyum-233'e (Pa-233) dönüşür. Bu da aynı şekilde, nötronca fazla zengin olan kararsız bir çekirdektir ve 27 günlük bir yarı-ömürle, bir elektron daha ışıyarak uranyum-233'e dönüşür. U-233 ise, fisil bir çekirdektir. Dolayısıyla Th-232, kendisi fisil olmamakla birlikte, yavaş bir nötron yutup iki beta bozunmasından geçtikten sonra, fisil bir çekirdek haline gelebilir. Yani 'doğurgan'dır. Tıpkı, nötron yutan bir uranyum-238 izotopunun, iki beta bozunmasından geçtikten sonra fisil plutonyum-239'a dönüşmesinde olduğu gibi. Bu iki izotop, Th-232 ve U-238, doğadaki yegâne doğurgan çekirdeklerdir. Kısacası, toryum doğrudan nükleer yakıt olarak kullanılamaz. Fakat nötronların dolaştığı bir ortama, örneğin uranyuma dayalı olarak çalışan bir termal reaktöre yerleştirilerek, yakıta dönüştürülebilir. Böyle bir ortamda, fisyona uğramakta olan U-235 çekirdekleri parçalanarak, enerjinin yanında yeni ve hızlı nötronlar üretirken, bu nötronların yavaşlamasından sonra birerini yutan Th-232 çekirdekleri U-233'e dönüşüyor olur. Bir yandan U-235 yakarken, diğer yandan Th-232'yi


Toryum bozunma zinciri
Z=90 Toryum
Th-232 14 Gy
Z=89 Aktinyum
Z=88 Radyum
4012 keV
Ra-228 5,75 y
Ac-228 6,15 h
Th-228 1,8 y
5423 keV
Ra-224 3,66 dk
Z=86 Radon
6585 keV
Rn-220 56 s
Z=84 Polonyum
6288 keV
Po-216 0,15 s
Z=83 Bizmut
Z=82 Kurşun
6778 keV
Pb-212 10 h
Bi-212 61 dk
Po-212 0,3 s
Z=81 Talyum
6051
8784 keV
Tl-208 3,1 dk
Pb-208 %52
alfa bozunması
beta bozunması

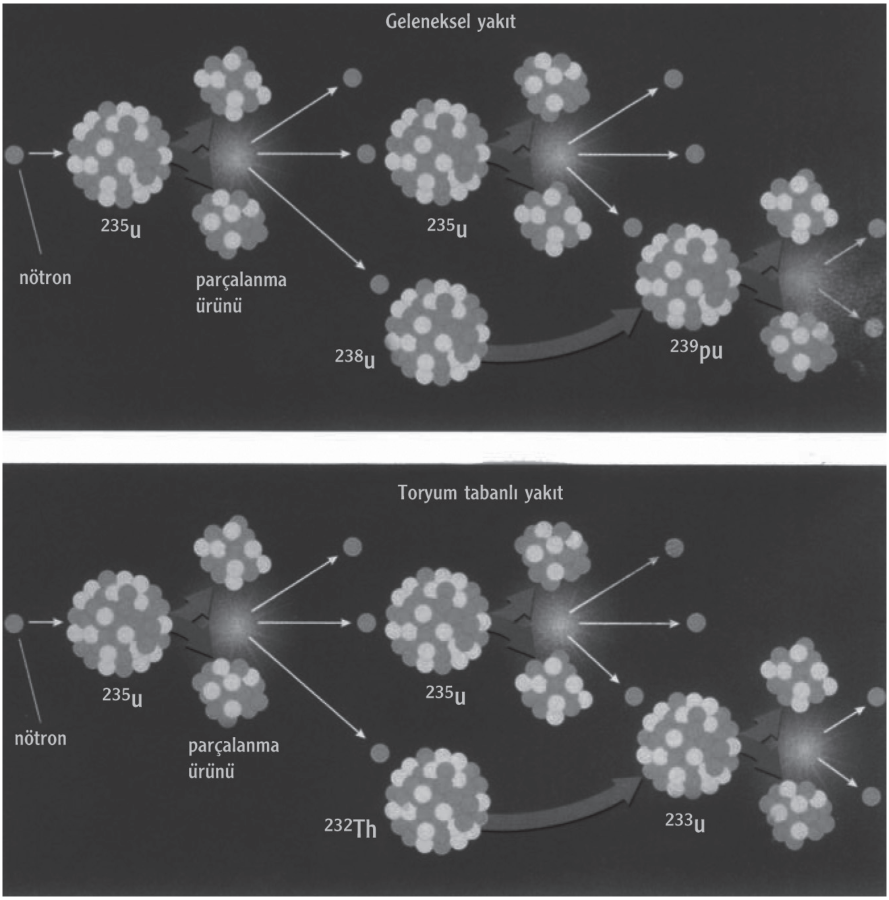
U-233'e dönüştüren bu döngü; U-235(Th-232)U-233 şeklinde gösterilebilir. Tıpkı, yakıt olarak sadece uranyum kullanan bir termal reaktördeki fisil U-235 çekirdekleri yakılırken, doğurgan olan U-238'lerin fisil Pu-239'lara dönüştürüldüğü, U-235(U-238)Pu-239 döngüsüne benzer şekilde...

Termal üretken: Biriken U-233, toryumla karıştırılıp, yeni bir termal reaktörde yakıt olarak kullanılabilir. Böyle bir reaktörde, U-233; bir yandan enerji eldesi için tüketilirken, diğer yandan, Th-232'nin dönüştürülmesiyle üretiliyor olur. Tıpkı, U-Pu yakıt kullanan hızlı bir reaktörde; Pu-239'un bir yandan tüketilirken, diğer yandan U-238'in dönüştürülmesiyle üretildiği Pu-230(U-238)Pu-239 döngüsünde olduğu gibi. Hem de U-233, termal ve hatta orta enerjili nötronlarla çalışıldığı takdirde, U-235 ve Pu-239'dan daha bile iyi bir fisil çekirdektir. Çünkü yuttuğu her nötron başına, diğerlerinden daha fazla nötron açığa çıkarır. 3 civarında olan bu sayının, örneğin 3 olması şu anlama gelir: Bir nötron yutulduğunda doğan 3 nötrondan; birisi, kaçınılmaz olan sistem dışına sızma veya işe yaramayan 'parazit' çekirdeklerin birisi tarafından yutulma sonucunda ziyan olsa dahi, geride kalan iki nötrondan; birisi bir başka U-233 çekirdeğinin fisyonuna yol açarken, ikincisi bir Th-232 çekirdeği tarafından yakalanıp U-233 oluşmasını sağlayabilir. Bu durumda, kaybedilen her U-233

Toryum Yakıt Döngüsü


²³⁷U
6,8 g
²³⁷Np
2.14 10⁶ y
²³⁶U
²³⁶ᵐNp
²³⁶Np
22 h
²³⁶Pu
1.6 10⁵ y
2.34 10⁷ y
²³⁵U
2.85 y
7.04 10⁸ y
²³⁴Th
24.1 g
²³⁴Pa
1.2 dk
²³⁴U
2.46 10⁵ y
²³³Th
22 dk
²³³Pa
27 g
²³³U
²³²Th
²³²Pa
1.3 g
²³²U
²³¹Th
25 h
²³¹Pa
68.9 y
3.28 10⁴ y
²³⁰Th
1.6 10⁵ y
²²⁹Th
²²⁸Th
²²⁷Ra
²⁰⁸Tl
²¹²Po
▨ Doğurgan
▨ Fisil
☐ Radyotoksik
(n,γ) soğurması
elektron yakalama
β-bozunması
α-bozunması
(n,2n) tepkimesi
(Eₙ: ≥ birkaç MeV)

çekirdeğinin yerine bir yenisi üretilmektedir. Sistemdeki fisil çekirdek sayısı zamanla azalmaz. Hatta eğer sistem, doğan 3 nötronun birinden azının ziyanına yol açacak şekilde tasarımlanmış ise, tüketilen fisil çekirdek sayısından fazlası bile üretilebilir. U-233(Th-232) U-233 döngüsüne dayalı böyle bir reaktör, 'termal üretken'dir. Termal reaktör teknolojisi oturmuş bir teknoloji olduğundan, nükleer yakıt üretmek için, Pu-239(U-238)Pu-239 döngüsünün gerektirdiği ve geliştirilmesinde sorunlarla karşılaşılmış olan 'hızlı üretken' reaktörlerin geliştirilmesine gerek kalmaz. Bilindiği üzere, halen çalışan


Geleneksel yakıt
nötron
^{235}u
parçalanma ürünü
^{235}u
^{238}u
^{239}pu
Toryum tabanlı yakıt
nötron
^{235}u
parçalanma ürünü
^{235}u
^{232}Th
^{233}u

Geleneksel nükleer yakıt hem parçalanabilir (^{235}u) ve hem de parçalanamaz (^{238}u) izotopları içerir. ^{235}u çekirdeğinin bir nötron çarpması sonunda parçalanması 2 ya da 3 nötronun serbest kalmasına yol açar. Bunlar da bir başka ^{235}u çekirdeğini parçalar ya da ^{238}u atomlarının plütonyum-239'a dönüşmesine yol açarlar. Bu element de parçalanabilir olduğundan reaktörün güç üretme sürecine katkıda bulunur. Toryum tabanlı nükleer yakıtlarsa (altta) büyük ölçüde aynı biçimde işlev yapar. Aradaki fark, ^{238}u'dan plütonyum üretilmesi yerine bir başka parçalanabilir uranyum izotopu (^{233}u) üretimi.

termal reaktörler sadece, doğal uranyumun sayıca %0,71 gibi düşük bir oranını oluşturan U-235'i yakmaya yönelik 'tek geçişli yakıt döngüsü'yle çalışmaktadır. Halbuki termal üretken toryum reaktörleri, doğal toryumun %100'ü Th-232'den oluştuğundan, toryum rezervlerinin tümünü yakıt olarak kullanabilir. Hem de toryum doğada uranyumun 3 misline yakın miktarda bulunduğuna göre, bu, nükleer yakıt rezervlerinin, yaklaşık 200 misli artırılması anlamına gelir.

Mevcut uranyum rezervlerinin, halen çalışmakta olan reaktörler için yaklaşık 60 yıl süreyle yeterli olduğu göz önünde bulundurulursa; toryuma dayalı termal reaktör üretken reaktörler, bu süreyi 10 bin yılın üzerine çıkartarak, nükleer güç üretiminin sürdürülebilirliğini artırabilir. Dahası var...

U-233(Th-232)U-233 yakıt döngüsü fazla plütonyum üretmediğinden, nükleer silahların yayılmasına karşı dirençlidir. Gerçi U-233'ün, namlu tipi basit bir bombanın yapımında kullanılması ve bu amaçla toryumdan kimyasal yöntemlerle görece kolay ayrıştırılması mümkündür. Fakat U-233'le birlikte oluşan U-232, 73,6 yıl yarılanma ömrüyle radyoaktif olduğu gibi bozunma ürünleri çok daha kısa yarılanma ömrüyle yüksek ışıma gücüne sahiptir ve ayrıca, ürünlerinden Bi-212 ve Tl-208 gibi bazıları, güçlü gama ışıyıcısıdırlar. Dolayısıyla, U-233'ün kullanılmış yakıttan ayrıştırılması, kimyasal yöntemlerle de olsa zordur. Kaldı ki; döngüye baştan bir miktar fakir uranyum katmak suretiyle, içeriğindeki U-233; çok daha zor olan zenginleştirme işlemine tabi tutularak U-238'den ayırıştırılmadığı sürece bomba yapımında kullanılamayacağı şekilde 'kirletilebilir'. Dahası da var...

U-233(Th-232)U-233 yakıt döngüsü Pu-239(U-238) Pu-239 döngüsüne oranla; Np, Am, Cm gibi ikincil aktinitleri ve plütonyumu çok daha az miktarlarda üretir. Her ne kadar, döngünün arka cephesinde Pa-231, Th-229 ve U-230 gibi başka 'radyotoksik' çekirdekler varsa da, miktarları görece az olduğundan, atıklarının uzun vadeli radyolojik etkisi çok daha azdır. Kaldı ki; toryum döngüsüyle çalışan reaktörler nötron zengini olduğundan, bu nötronların bir kısmı, enerji ve fisil çekirdek üretiminin dışında, örneğin aktinitlerin fisyona uğratılarak 'yakılması'nda kullanılabilir. Böylelikle, uranyuma dayalı termal reaktörlerde oluşan atıkların en önemli bileşeni ortadan kaldırılmış olur. Ayrıca, toryum döngüsünde yakılacak çekirdekler arasına plütonyum da katılabilir. Böylelikle, uranyuma dayalı termal reaktörlerin ürettiği 'sivil' ve nükleer silahların azaltılması anlaşması kapsamına yok edilmesine karar verilen başlıkların içeriğindeki 'askerî' plütonyum, enerji üretiminde kullanılarak, çok daha hızlı bir şekilde ortadan kaldırılabilir mümkün hale gelir. Yani toryum döngüsü yayılmaya karşı dirençli olduğu gibi, uranyum döngüsüne de dirençli hale getirebilir.

YALNIZ, BİR SORUN VAR...

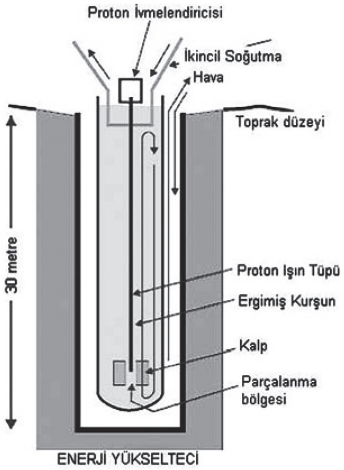
Bir reaktrörün çalışması sırasında kalbinde, gerek nötron yutmaları, gerekse fisyonlar sonucunda, yakıtın başlangıçta içerdiğinden farklı çekirdekler oluşmakta ve bir yandan da bunların pek çoğu, aynı şekilde nötron yutarak veya kararsız olduğundan bozunarak başka çekirdeklere dönüşmektedir. Genel olarak, yarılanma ömrü saniye veya dakika düzeyinde kısa olan radyoaktif çekirdekler, pek sorun yaratmazlar. Çünkü hızla bozunup yok olurlar ve bu arada ışıdıkları parçacıklar, reaktörün korumalı hacmi içerisinde durdurulur. Yarılanma ömrü onlarca yıl düzeyinde olan radyoaktif çekirdekler ise, bu arada nötron yutup başka çekirdeklere dönüşmedikleri takdirde, varlıklarını uzun süre devam ettirirler ve işletme sırasında bazı olumsuzluklara yol açıyorlarsa eğer, reaktör buna tahammül edecek şekilde tasarımlanmıştır ve tahammül edilerek işletilir. Ancak bu, ‘yakıt döngüsü’nün işletme sonrasıyla ilgili bir ‘arka cephe’ sorunudur. İşletme açısından asıl dikkate alınması gereken çekirdekler, yarılanma ömrü aylar düzeyinde olan ‘orta vadeli’ radyoaktif izotoplardır.

Şimdi bu bilgilerin ışığında, Th-232’nin U-233’e dönüşme sürecine biraz yakından bakalım. Th-232 aslında, nötron yakalamaya pek de eğilimli sayılmaz; termal nötronlar için oldukça küçük bir ‘yakalama tesir kesiti’ne sahiptir (σ_C=7,4 barn) (1 barn=10^{-24} cm^2). Yakalama olasılığı gerçekleştiğinde oluşan Th-233 ise; çok daha büyük (σ_C=643 barn) bir yakalama kesitine sahip olmakla beraber hayli kararsız olduğundan, çoğunlukla nötron yakalamaya fırsat bulamadan, 22 dakika yarılanma ömrüyle beta bozunmasına uğrayarak, protaktinyum-233’e dönüştür (Pa-233). Buraya kadar sorun yok. Fakat Pa-233’ün yarılanma ömrü, görece uzun olup, 27,1 gündür. Dolayısıyla, beta bozunarak U-233’e dönüşene kadar, aylarca beklemesi gerekebilir. Halbuki bu izotop aynı zamanda, nötron yakalamaya oldukça eğilimlidir (σ_C=22 barn). Reaktörde bırakıldığı takdirde, bir nötron yutarak Pa-234’e dönüşebilir. Pa-234 ise nötronlara karşı ilgisiz olup, 1,2 dakika yarılanma ömrüyle, keza beta bozunarak U-234’e dönüşür. Halbuki uranyumun bu izotopu, genelde aktinitlerin tek kütle sayılı izotopları fisil iken çift sayılıları böyle olmadığından, fisil değildir. Ya nötron yutarak (σ_C=95 b) U-235’e, ya da yaklaşık 250.000 yıl yanlanma ömrüyle alfa ışıyarak, Th-230’a dönüşür.

Kısacası, Pa-233’ün bozunmadan önce nötron yutması, hem bir nötronun ziyanı, hem de fisil bir çekirdek oluşumundan mahrum kalınması demektir. Dolayısıyla, bu çekirdeklerin oluştuktan sonra tümüyle bozunana kadar yaklaşık 10 yarılanma ömrü, yani 1 yıl kadar süreyle, nötron ortamından uzaklaştırılması gerekir. Bu ise mevcut reaktör tasarımlarında, işletmenin sık sık durdurulması ve ekonomik olmaktan uzaklaşması anlamına geliyor. Öte yandan, yakıtta oluşan U-232 ile bozunma ürünlerinin yüksek radyoaktivitesi nedeniyle, yakıt işleme sürecinin uzaktan kumandalı aygıtlarla yapılması gerekmekte. Bu da keza, döngü maliyetini yükselten bir unsur. Toryum kullanımı esas olarak bu yüzden yaygınlaşamadı. Bu engelleri aşmak için, Güney Afrika'nın uluslararası bir ortaklıkla geliştirmeye çalıştığı 'çakıl yataklı' reaktör tasarımı üzerinde çalışılıyor. Bir diğer seçenek, 1970'li yıllarda geliştirildikten sonra terk edilmiş bulunan, sıvı yakıtlı 'ergimiş tuz reaktörü'. Yakıtın reaktöre sürekli bir şekilde girip çıktığı her iki tasarım da, geliştirilmesine çalışılan IV. nesil tasarımları arasında. Toryum döngüsünün ön ve arka cephe aşamalarında aşılması gereken başka engeller de var...

ThO_2'nin yüksek ergime sıcaklığına ve kimyasal kararlılığa sahip bir bileşik olması, yakıtın reaktörde kullanımı açısından üstün bir özellik olmakla birlikte, imalatı ve işlenmesi sırasında güçlüklere yol açıyor. Örneğin, yakıt toz halinde dioksitin fırınlanması için 2000°C'nin üzerinde sıcaklıklara çıkılması gerekmekte. Öte yandan, kullanılmış yakıtın işlenmesine yönelik THOREX sürecinde, ThO_2 kimyasal kararlılığı nedeniyle, derişik nitrik asitle pek çözünmüyor. Çözünmesini artırmak için çözeltiye hidrojen florid (HF) katılması gerekmekte. Bu ise, paslanmaz çelik ve boruların paslanmasına yol açıyor. Buna rağmen çözünme uzun zaman aldığından, süreç hâlâ ekonomik değil. Ayrıca toryumu uranyum ve plütonyumdan ayrıştırmanın 'üç akışlı' tatminkâr bir kimyasal yöntemi, kuramsal olarak mümkün görünmekle beraber, geliştirilmeye muhtaç. Son olarak, toryum döngüsünde ortaya çıkan izotopların nükleer tepkimeler açısından davranışlarını belirleyen 'tesir kesiti' özellikleri, henüz ayrıntılı bir şekilde incelenip belirlenmiş değil.

Sonuç olarak, toryum döngüsünün hayata geçirilebilmesi için, tamamlanmaya muhtaç pek çok araştırma-geliştirme kalemi var. Buna karşılık, uranyum döngüsünün teknolojisi oturmuş ve nükleer enerji alanındaki kullanımı yaygınlaşmış halde. Uranyum temininde şimdiye kadar herhangi bir darboğazın yaşanmamış olması, toryum çalışmalarının geri planda kalmasına yol açtı. Giderek yaygınlaşan enerji yetmezliği algısı, bu çalışmalara hız kazandırdı. Tasarımlar arasında, esas olarak 'hızlandırıcıyla atık dönüştürme'ye (ATW) yönelik olarak geliştirilmesine çalışılan, 'enerji yükseltici' de var...



Toryum esaslı enerji yükseltici: U-233'ün çekiciliği karşısında, Nobel ödüllü fizikçi Carlo Rubbia, toryum esaslı ve kendi adıyla anılan bir enerji santralı tasarımı geliştirdi. Bu tasarımda Th-232, nötron yerine yüksek enerjili proton bombardımanıyla U-233'e dönüştürülüyor. (Th-232 + p → Pa-233 → U-233 + e^-).

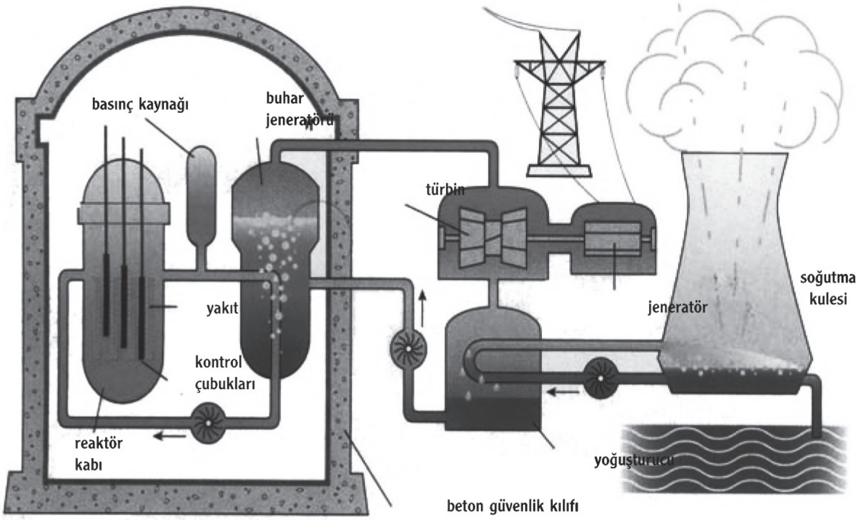
Tabii bir de nötron üretilerek, oluşan U-233 çekirdeklerinin fisyona uğratılması lazım. Rubbia'nın tasarımı bunu, yine protonların bombardımanı sırasında kurşun gibi ağır çekirdeklerden 'parça kopması' (*spallation*) sonucunda ortaya ortaya çıkan nötronlarla başarmayı hedefliyor. Nötronlardan bazıları Th-232 çekirdekleri tarafından yutularak bunları U-233'e dönüştürürken, diğer bazıları mevcut U-233'lere çarparak bunların fisyonuna yol açmakta. Proton ışını kesildiğinde, fisyonlar duruyor. Ancak, öngörülere göre; bu arada yer almış olan çekirdek parçalanmaları sonucunda, protonların ivmelendirilmesi için harcanan enerjinin 60 misli kadar enerji elde edilmiş olacak. Bu yüzden de Rubbia'nın tasarımına 'enerji yükselteci' deniyor. Hem de, tasarımda yakıt hammaddesi olarak sadece toryum kullanıldığından ve doğal toryum %100 Th-232 izotopundan oluştuğundan, uranyumda olduğu gibi bir zenginleştirme işlemine gerek kalmıyor.

'Toryum Esaslı Enerji Yükselteci'nin kalbi, şekilde görüldüğü gibi; toprak düzeyinin altına yerleştirilmiş, 30m yüksekliğinde ve 6m yarıçapında, çelik bir silindir kap biçiminde tasarımlanmakta. İçi yaklaşık 10.000 ton kurşunla dolu olan kabın alt kısmında, yakıt hammaddesini oluşturan toryum bulunuyor. Yukarıdan aşağıya, bu toryum malzemesine doğru, bir proton ivmelendiricisi uzanıyor. Protonlar 'parçalanma bölgesi'ne vardıklarında, bir yandan Th-232'yi U-233'e çeviriyor, bir yandan da kurşun çekirdeklerini parçalayarak, U-233'ün fisyonu için gerekli nötronları üretiyor. Çoğunlukla fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi olarak açığa çıkan enerji kurşunu ısıtıp eritiyor. Isınan kurşun, çelik kap içerisinde, doğal konveksiyonla yükseliyor. Dolayısıyla bir yandan da, soğutucu görevi görüyor. Kabın kendisi ise dışından, havanın zorlamalı konveksiyonuyla soğutulmakta.

Tasarım çekici görünmekle birlikte, tepkime dizisinin enerji açısından karlı bir şekilde sürdürülebilmesi, 14 MW güç düzeyinde bir hızlandırıcı gerektiriyor. Halbuki şimdiye kadar yapılmış olan en güçlü hızlandırıcı 1,2 MW güce sahip. Öte yandan çelik kabın, 1200°C'ye kadar ısınan kurşunun içinde erimesi gibi, ciddi bazı mühendislik problemlerinin aşılması lazım. Şimdilik, bilgisayar benzetişimleri ve küçük ölçekli bazı testleri yapılmış. CERN'den başka, ABD, Japonya ve Rusya'da da laboratuvar ölçeğinde çalışmalar planlanıyor. Ama sistem, çalışan bir prototip olarak henüz ortada yok. Ekonomikliği de meçhul...

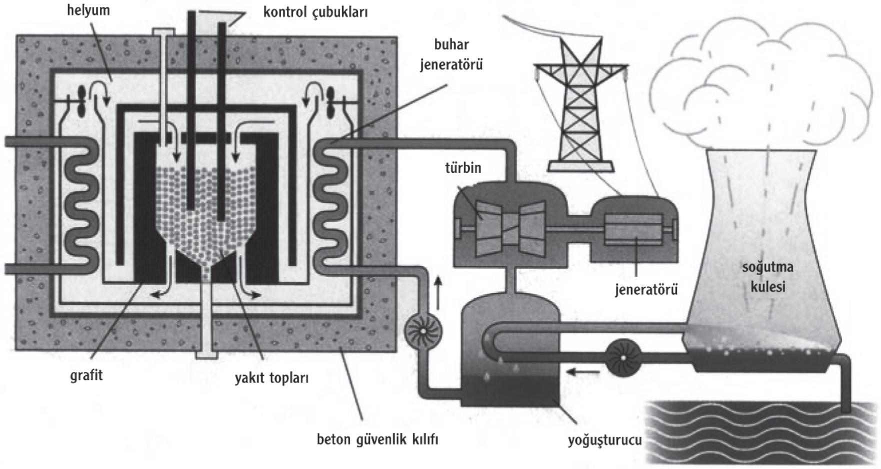
URANYUM DÖNGÜSÜNÜ HATIRLAYALIM

Hafif su reaktörü (PWR): Bilindiği üzere, kütle numarası yüksek olan elementler, yeterince yüksek enerjili bir nötronun isabetiyle, küçük bir olasılıkla da olsa parçalanabilir. Ancak, 'fisil' çekirdek diye, 'termal' olarak nitelendirilen düşük enerjili veya yavaş nötronlar tarafından da parçalanabilen çekirdeklere denir. İlk elde garip görünebilecek bir şekilde, fisil çekirdekler yavaş nötronlarla çok daha kolay parçalanabilirler. Uranyum-235 doğada anlamlı miktarlarda bulunan yegâne fisil çekirdektir ve doğal uranyumun sadece %0,7'sini oluşturur. %99,3 oranıyla çok daha bol olan U-238 ise, fisil değildir. Fakat, orta enerjili bir nötron yuttuktan sonra iki beta bozunmasından geçerek, fisil Pu-239 izotopuna dönüşebilir. Böyle çekirdeklerin 'doğurgan' olduğu söylenir. Fisyonlarını ağırlıklı olarak termal nötronlarla gerçekleştiren, dolayısıyla da, her an için barındırdığı nötron nüfusu büyük oranda yavaş nötronlardan oluşan reaktörlere 'termal reaktör' denir. Dünyada halen çalışan 435 nükleer santral ünitesinin, biri hariç tümü 'termal reaktör'dür. Yakıt olarak temelde uranyuma dayalıdırlar. Böyle bir reaktörde, U-235 çekirdekleri birer yavaş nötron yutup, orta ağırlıkta iki 'fısyon ürünü'ne parçalanırken, açığa enerjiyle birlikte, iki veya üç tane hızlı nötron çıkar. Bu nötronların %99'dan fazlası, fısyonla birlikte 'ani', kalan küçük kısmı da, kararsız fısyon ürünlerinin bozunmasıyla 'gecikmiş' olarak doğar. Fisyondan açığa çıkan nötronlardan; birinin, birden fazlasının veya azının, sonuçta bir başka fisyona yol açabilmesi halinde, sistemin sırasıyla; 'kritik', 'üst kritik' veya 'alt kritik' olduğu söylenir. Yeni doğan nötronlar, yüksek enerjilidir. Gerçi, U-235 ve U-238'lerini 'hızlı fısyon'a uğratabilirler. Fakat bunun olasılığı çok düşüktür. Halbuki, yavaşlatılmaları halinde, U-235 çekirdeklerini fisyona uğratmaları olasılığı büyük oranda artar. Bu işlevi en iyi, hızlı nötronların; tıpkı eşit kütleli bilardo toplarının çarpışmalarında olduğu gibi; hidrojen, döteryum veya karbon gibi hafif çekirdeklerle çarpışmasıyla gerçekleşir. Bu işlevi gören çekirdeklere 'yavaşlatıcı' denir. En etkin yavaşlatıcı, kütlesi nötronunkine en yakın olan hidrojendir. Fakat hidrojen bazen, çarpışma sırasında nötronu yutup döteryum oluşturarak, nötronun ziyanına yol açar. Döteryum ise hidrojenin, kabaca yarı-



Toryum tabanlı yakıtlar, suyun hem kalpten ısı transferi için ve parçalanma tepkimesinde ortaya çıkan nötronları yavaşlatmak için kullanıldığı basınçlı su reaktörleri (üstte), hem de ısı transferi için helyum gibi gazlar ve nötronları yavaşlatmak için de grafit kullanılan yüksek sıcaklık gaz reaktörleri (sağda) için uygun.

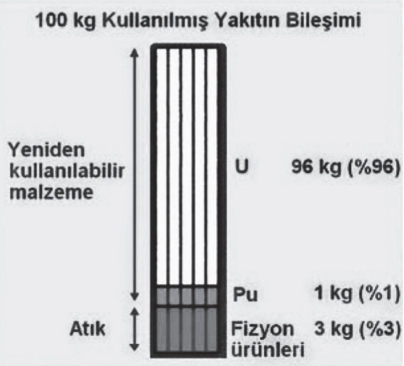
sı kadar yavaşlatma etkinliğe sahiptir. Ancak, nötron yutmaya çok daha az eğilimlidir. Dolayısıyla, yavaşlatıcı olarak döteryum kullanılırsa, nötronların daha azı ziyan olur, daha büyük bir kısmı fisyona yol açar. Bu sayede, doğal uranyumlu bir sistemi kritik hale getirmek mümkündür. Ancak, döteryumun yavaşlatıcı etkisi daha düşük olduğundan, birim yakıt kütlesi başına, hidrojene oranla daha fazlasının kullanılması gerekir. Buna karşılık, yavaşlatıcı olarak hidrojenin tercih edilmesi halinde, kritikliği başarmak için, uranyumun U-235 içeriğinin %1-5 civarında zenginleştirilmesi lazımdır. Hidrojen, hafif, döteryum ise ağır suda boldur. Dolayısıyla, çoğu termal reaktör tasarımında yavaşlatıcı olarak, hafif ya da ağır su kullanılır. Bu su aynı zamanda soğutucu işlevini de görür. Suyun kaynaması istenmiyorsa, yüksek basınç altında tutulması lazımdır. Bu yüzden, 'yavaşlatıcı-soğutucu' olarak hafif su kullanan termal reaktörlere 'basınçlı hafif su reaktörü' (PWR), ağır su kullananlara da 'basınçlı ağır su reaktörü' (PHWR) denir. Suyun kaynamasına izin verilen termal reaktörler ise, 'kaynar su reaktörü' (BWR) olarak isimlendirilir. Dünyadaki 435 reaktörün; biri hariç, hepsi termal ve 268'i PWR tipinden. En az yaygın olan termal tip ise, soğutucu-yavaşlatıcı olarak karbondioksit veya helyum kullanan, İngiliz tasarımı 'gaz soğutmalı reaktör'ler (GCR)...



Soğutmayı etkin bir şekilde başarmak için, yakıt ince çubuklar halinde imal edilerek, etrafından su geçirilir. Çubuklardan birinde yer alan bir fisyondan açığa çıkan hızlı nötronların büyük bir kısmı, yutulmadan dışarı çıkıp, suda dolaşırken yavaşlar. Sonra, başka bir yakıt çubuğuna girip yeni fısyonlara yol açar veya yolda, sistemin dışına sızarak ya da nötron yutmalarına rağmen fisyona uğramadıklarından 'parazit' olarak nitelendirilen çekirdekler tarafından yutularak ziyan olurlar. Orta enerji düzeylerine kadar yavaşlamış olan nötronların, ortamda bol miktarda bulunan U-238 izotopları tarafından yutulmaları olasılığı, bu çekirdeğin 'soğurma rezonansları' nedeniyle yüksektir. Nötron yutan U-238, iki beta bozunmasından geçip, fisil Pu-239'a dönüşür. Pu^{239} iyi bir fisil çekirdek olduğundan, fısyona uğrayıp enerji üretebilir. Bazıları nötron yutmaya devam ederek, plutonyum-240, 241, 242 izotoplarına dönüşür. Pu^{241} beta bozunmasına uğrayarak Am^{241}, alfa yutarak da kürium-245 üretir. Amerisyum, kürium ve neptünyum da plütonyum gibi, periyodik tablodaki 'aktinitler' serisinin, 'uranyum ötesi' elementlerindendir. Reaktörde plütonyum ve uranyuma oranla çok daha az miktarlarda oluştuklarından, 'ikincil aktinitler' olarak nitelendirilirler. Aktinitler serisinin ortak özelliği, bazı radyoaktif izotoplarının çok uzun yarıömürlü olmasıdır. Pu^{239}'un yarı ömrünün 24.000 yıl olmasında olduğu gibi. Aktinitlerin uzun süreyle radyoaktif kalması, radyoaktif akıt yönetimini zorlaştıran en önemli unsurdur. Genel kural olarak, uranyumda olduğu gibi; plütonyumun da tek kütle sayılı izotopları fisil iken, çift kütle sayılı izotopları, ancak hızlı nötronlar tarafından parçalanabilir. Dolayısıyla, reaktör kalbinde bir yandan fisil U-235 çekirdeklerinin parçalanmasıyla enerji üretilirken, diğer yandan, bazıları fisil olan plütonyum izotopları oluşmaktadır. Oluşan plütonyumun tek kütle sayılı izotoplarının bir kısmı fısyona uğrayarak enerji üretimine katkıda bulunur. Yeterince uzun bir işletme süresinden sonra, plütonyum izotoplarının oluşma ve nötron yutarak yok olma süreçleri dengeye ulaşır. Sonuç olarak; termal bir reaktörde oluşan Pu^{239}'un yarısı fısyona uğrayıp, üretilen enerjinin 1/3 kadarını sağlar ve yaklaşık 1/6 kadarı, nötron yutmaya devam ederek, daha yüksek kütle sayılı izotoplara dönüşürken; kalan 1/3'ü birikir. Öte yandan, nötron yutan U^{235} çekirdeklerinden bazıları, henüz fısyona uğrayamadan bir nötron daha yuttuktan sonra beta bozunmasına uğrayarak, neptünyum-237 izotopuna dönüşür. Np^{237} izotopu, U^{238} çekirdeğinin bir nötron yutup iki nötron saldıktan (n,2n) sonra beta bozunması uğramasıyla da oluşur. Fisyona uğrayan çekirdekler ise; stronsiyum (Sr), sezyum (Cs), kripton (Kr), baryum (Ba), iyot (I) gibi fısyon ürünlerine parçalanmaktadır. Kalpte en fazla biriken çekirdekler, parazit işlevi gören bu fisyon ürünleridir. Zamanla reaktörün kritikliğinin devamını güçleştirir ve yakıtın, kısmen de olsa yenilenmesini zorunlu kılarlar.

Kullanılmış PWR yakıtı: 1000 MWe gücündeki PWR tipi bir reaktörde kullanılan, 100 ton civarındaki ve %4 oranındaki düşük zenginlikti yakıt stoğunun, yaklaşık üçte biri, 18 ila 24 ayda bir yenilenir ve bu işlem en az iki hafta alır. Yani ortalama olarak, reaktör yılda en az 11 gün servis dışı kalır ve yakıtının 20 ton kadarı değiştirilir. Çıkartılan kısım, en yüksek nötron nüfusunu görmüş olan ve dolayısıyla en fazla fisyona uğramış bulunan merkez civarındaki demetlerdir. Geride kalan demetler merkeze doğru kaydırılır ve yeni yakıt demetleri kalbin çeperine yerleştirilir. Yani yakıt yenileme işlemi 'merkezden dışarı, çeperden içeri' ilkesine göre yapılır. Amaç, gücün yarıçap doğrultusunda homojen dağılmasını sağlamaktır.

Reaktörden çıkan yakıta, 'kullanılmış yakıt' denir. Yakıtın çıkartılma nedeni, enerji içeriğinin tükenmiş veya hatta fisil çekirdek oranının azalmış olması değil, nötron yutan ve fakat fisyona uğramayan çekirdeklerin birikmiş olması nedeniyle, reaktörün kritikliğini sürdürmenin güçleşmiş olmasıdır. İçeriğinde hâlâ, kütlece %1 kadar, fisyona uğramamış U^{235} bulunur. Bunun dışında; %95'i U^{238}, %1 kadarı plütonyum, %3'ü de fisyon ürünleri ve ikincil aktinitlerden


100 kg Kullanılmış Yakıtın Bileşimi
Yeniden kullanılabilir malzeme
Atık
U
96 kg (%96)
Pu
1 kg (%1)
Fizyon ürünleri
3 kg (%3)

oluşmaktadır. Kullanılmış yakıt, bir nükleer reaktörde oluşan radyoaktivitenin %99'unu bünyesinde barındırır. Kalan 961, reaktörün basınç kabı gibi yapı elemanlarında oluşur. Yakıt bu haliyle, radyoaktivitesi nedeniyle ısı üretmektedir. Dolayısıyla, zırhlanıp soğutulması lazımdır. Reaktör koruma binasının içindeki bekletme havuzlarına konur. Havuzdaki su iyi bir zırh malzemesi oluşturur ve ayrıca, zorlamalı taşınımla yakıtı soğutur. Yakıt bu şekilde, bir yıl kadar bekletilir. Amaç, daha sonraki işlemlere görece daha kolay tabi tutulabilmesi için, radyoaktivitesinin azalmasıdır.

Bundan sonrası için iki seçenek vardır: Ya yakıtı gözden çıkarıp 'atık' saymak ya da yeniden işlemek. Yeniden işlemenin amacı, kullanılmış yakıtın içeriğindeki, başta uranyum ve plütonyum olmak üzere, işe yarar izotopları ayrıştırıp, yeni yakıt üretiminde kullanmaktır. İşlem aynı zamanda atıkların hacmini azaltarak, yönetimini kolaylaştırır.

Yeniden işleme: Yeniden işleme sürecinde, yakıt çubukları mekanik olarak kesilip parçalandıktan sonra, derişik nitrit asit çözeltisinde çözülür. İçindeki uranyum ve plütonyum ayrıştırıldıktan sonra, toz halinde UO_2 ve PuO_2 elde edilir. Geri kazanılan uranyum bileşeni, U^{235} açısından %0,8 ila %1 oranında zengindir. Fakat içinde ayrıca doğal uranyumda bulunmayan, yakıtın reaktörde kullanımı sırada oluşmuş olan ve fisil olmayan U^{232}, U^{236} (%0,4) izotopları da vardır. Bu çekirdekler, U^{235} ve U^{238}'den çok daha hızlı bozunurlar ve U^{232}'nin ürünlerinden, talyum-208 gibi bazıları güçlü gama ışıyıcısıdır. Dolayısıyla, yeniden işlemenin, bu bozunma ürünlerinin fazlaca birikmesine fırsat vermeden önce yapılması lazımdır. Aksi halde, imal edilecek olan yeniden işlenmiş yakıt, doğal uranyumdan imal edilen taze yakıta oranla çok daha fazla radyoaktif olur. Bu durum, söz konusu yakıtın özel önlemlerle işleme tabi tutulması ve ayrıca, kullanılacağı reaktörün daha etkin bir şekilde zırhlanması gereksinimlerini doğurur. Öte yandan, U^{236} fisil olmadığı gibi, güçlü bir nötron soğurucusudur da. Bunun telafisi için, yeniden işlenmiş yakıttaki U^{235} zenginliğinin, taze yakıttakine oranla daha yüksek olması gerekir. Oysa ki, kullanılmış yakıttan elde edilen uranyumun zenginleştirme işlemi, radyoaktivitesinin yüksekliği nedeniyle, doğal uranyumunkinden ayrı yapılmak zorundadır. Bütün bunlar, süreçlerinin çok sayıdalığı ve karmaşıklığı nedeniyle taze uranyum kullanmaya oranla zaten pahalı olan 'yeniden işleme' süreciyle elde edilen yakıtın maliyetinde ek artışlara yol açar. Bu ise zamanında işlenmeyen kullanılmış yakıtın, yeniden işlenmesinin giderek zorlaşması anlamına gelir. Plütonyuma gelince...

20 ton kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinden elde edilen plütonyum 230 kg kadardır. Bu plütonyumun izotop bileşimi, bomba yapımına uygun değildir. Çünkü, bu amacın gerektirdiği süperkritik düzeyini başarabilmek için, plütonyumun %90'dan fazlasının fisil izotoplardan oluşması gerekir. Halbuki, U^{238}'in nötron yutması sonucunda oluşan Pu^{239}, reaktörde kaldığı sürede art arda nötronlar yutarak, daha yüksek kütle numaralı izotoplar oluşturmuştur. Sonuç olarak, kullanılmış yakıttan elde edilen plütonyumun ancak 2/3 kadarı fisildir (%50 Pu^{239}, %15 Pu^{241}). Kalan 1/3'ü ise, fisil olmayan izotoplardan (Pu^{240}, Pu^{242}) oluşur. Fakat, bu malzeme yine de, çok yüksek bir enerji içeriğine sahiptir. Çünkü, plütonyumun tek veya çift izotopları, yüksek enerjili nötronlarla fısyona uğratılabilir. Dolayısıyla %65 düzeyindeki fisil çekirdek oranıyla etkin bir yakıt malzemesi oluşturan bu plütonyumu, aslında %3 lia %5 civarında 'düşük zenginlikli uranyum' (LEU) için tasarımlanmış olan hafif su reaktörlerinde (LWR) de yakmak mümkündür. Bunun için PuO_2'nin, UO_2 ile karıştırılma oranının daha düşük, %5 civarında tutulması gerekir. Çünkü %5'lik bir karışım; uranyum bileşeninin %1 zengin olduğu varsayılırsa; %4,2 oranında zengin yakıta eşdeğerdir. Kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinden elde edilen plütonyumun hafif sulu termal reaktörlerde kullanılmasına; 'plütonyum döngülü karışık oksit' (PUREX) veya 'metal oksitli yakıt' (MOX) anlamında 'PUREX/MOX yakıt döngüsü' deniyor. MOX yakıtını bu reaktörlerde, %30'a varan oranlarda yakıt olarak kullanmak mümkündür. Fakat bu kullanım sırasında, plütonyumun içeriğindeki fisil olmayan çift sayılı izotopların oranı artar. Dolayısıyla, kullanılmış olan MOX yakıt, yeniden işlenip, yine termal reaktörlerde ikinci kez yakıt olarak kullanılmaya uygun değildir. Halbuki, kullanılmış MOX yakıtın içeriği hâlâ, ciddi bir enerji potansiyeli barındırmaktadır. Örneğin, plütonyumun tek sayılı izotopları fisil olduğu gibi, çift sayılı izotopları, tüm aktinitler de dahil olmak üzere, görece yüksek enerjili nötronlarla fisyona uğratılabilir. Dolayısıyla, kullanılmış MOX yakıttan elde edilen plütonyu-

mu, 'hızlı' reaktörlerde 'yakmak' mümkündür. İleride bu şekilde kullanılmaları olasılığı nedeniyle saklanıyorlar. Süreç; Fransa, Almanya, İngiltere, Belçika gibi Avrupa ülkeleri ve Japonya tarafından uygulanıyor. Nedeni, nükleer yakıt döngüsünden kaynaklanan atakların hacmini azaltması. ABD ise 1977 yılında Carter yönetimi tararından yasaklandı. Nedeni, özellikle plütonyumdan kaynaklanan güvenlik endişeleriydi…

Çünkü plütonyum, kimyasal açıdan güçlü bir zehir. Hem de ağır olduğu için, vücuda girdiği takdirde, atılması zor bir element. Ayrıca, izotoplarının alfa ve beta aktivitesi nedeniyle, özellikle solunum yoluyla alındığında, akciğerlere yerleşerek ölüme varan sağlık risklerine yol açar. Dolayısıyla, kullanılmış yakıttan ayrıştırılan plütonyum, her ne kadar çift sayılı izotoplarının çokluğu nedeniyle enerji verimi yüksek bir nükleer bomba yapmaya uygun değilse de, terör amacıyla yakıt işleme tesislerinden çalınıp, alışıldık patlayıcılarla karıştırılarak, 'kirli bomba' yapımında kullanılabilir. İç veya dış güvenlik açısından tehdit oluşturan bu olasılık, tesislerin çoğalması ve ortalıkta dolaşan plütonyum miktarının artmasıyla birlikte artar. Öte yandan, yakıt işleme teknolojisini edinen ülkeler için, yakıtı reaktörden sık sık çıkartıp işleyerek içinde oluşan plütonyumu, çift sayılı izotoplarının çoğalmasına imkân vermeksizin ayrıştırıp biriktirmek imkânı doğar. Birkaç kilogramlık plütonyum, kaba da olsa bir bombanın yapımı için yeterlidir. Bu durum, nükleer silahların yayılmasının kolaylaşması ve uluslararası güvenlik risklerinin artması anlamına gelir.

Halbuki bu plütonyumu oksite çevirip, nötron enerji spektrumu görece yüksek olacak şekilde tasarımlanmış olan 'hızlı' reaktörlerde 'yakmak' mümkündür.

Hızlı üretken reaktör (FBR): U-235'in düşük enerjili nötronlara karşı fisyon kesiti büyük olduğundan, termal nötronların büyük çoğunluğu bu çekirdekler tarafından soğurulur. Plütonyumun daha hızlı üretilmesi isteniyorsa, nötron nüfusunu düşük enerjilerden orta yükseklikte enerjilere doğru kaydırmak gerekir –ki, U-238'lerde yutulma olasılığı yaklaşık aynı kalırken, U-235'lerin fisyon olasılığı azalsın. Bu; hem soğutucu hem de yavaşlatıcı işlevi gören suyun yerine, nötronları pek de yavaşlatmayan, örneğin sıvı sodyum veya bizmut-kurşun karışımı gibi, orta ağırlıkta çekirdeklerden oluşan bir soğutucu kullanmakla gerçekleştirilebilir. Tabii, U-235'in fisyon olasılığı azaldığına göre, aynı güç düzeyini tutturabilmek için; nötron nüfusunun veya yakıtın zenginlik oranı anlamına gelen birim hacmindeki U-235 sayısının artırılması gerekmektedir. Bu, fisil U-235 çekirdeklerini tüketirken, doğurgan U-238 çekirdeklerini fisil Pu-239 çekirdeklerine dönüştüren döngü; U-235(U-238)Pu-239 şeklinde gösterilebilir. Yakıt, %20 oranında, 'yüksek düzeyde zenginleştirilmiş uranyum'un (HEU) oksiti olabileceği gibi, %20 ila %80 oranında $Pu0_2$-$U0_2$ karışımı da olabilir. Reaktör bu ikinci durumda; bir yandan Pu-239 tüketirken, diğer yandan U-238 çekirdeklerinden, keza Pu-239 üretir. Yani, döngü Pu-239(U-238)Pu-239 şeklini alır. Bu döngüde kullanılan plütonyumun daha önceden, başka bir termal veya hızlı üretken reaktörde üretilmiş olması gerekir. Uygun bir tasarımla reaktör, birim zamanda tükettiğinden daha fazla fisil çekirdek dahi üretebilir. Bu durumda reaktörün, net yakıt üreticisi olduğu söylenir. Yani bu 'hızlı reaktör', 'hızlı üretken'dir. Çıkartılan yakıt, daha sonra kimyasal işlemlere tabi tutulup, içindeki plütonyum ayrıştırılarak, tekrar yakıt üretiminde kullanılabilir. Bu sürecin art arda birkaç kez tekrarlandığı döngüye, 'kapalı yakıt çevrimi' denir. Hatta, doğal uranyumun zenginleştirilmesi işleminden geriye kalan 'fakirleşmiş uranyum' da döngüye sokulup, içeriğindeki U^{235} çekirdekleri, örneğin kalbin etrafına 'battaniye' olarak yerleştirilerek, kalpten sızan nötronların bombardımanıyla Pu^{239}'a dönüştürülebilir. Böylelikle doğal uranyumun tümünü yakıt olarak kullanmak mümkündür.

Termal reaktörler ise çoğunlukla, 'tek geçişli yakıt çevrimi'ne dayalı olarak çalışmak üzere tasarımlanmışlardır. Yani kalbe konan yakıtın, içerdiği U^{235} oranı belli bir düzeyin altına inene kadar kullanıldıktan sonra çıkartılıp beklemeye alınması ve yerine yenisinin konması hedeflenir. Dolayısıyla, termal reaktörler esas olarak, doğal uranyumdaki çekirdeklerin yalnızca %0,7 kadarını oluşturan U^{235} izotoplarının parçalanmasıyla enerji üretimine yöneliktirler. Halbuki, hızlı üretken reaktörlerin desteğine dayalı bir 'kapalı yakıt çevrimi' sayesinde, doğal uranyumun birim ağırlığından, 'tek geçişli yakıt çevrimi'ne göre, kuramsal olarak 60 misli daha fazla enerji elde etmek mümkündür. Ancak hızlı reaktör teknolojisi, doğal uranyum fiyatlarının başlangıçta tahmin edilen hızla artmaması nedeniyle, gelişip yaygınlaşamadı. Fransa'da 223 MWe gücündeki prototip Phénix hızlı reaktörü 1973 yılından bu yana kesintili olarak çalıştırılmakta. 1200 MWe gücündeki halefi Superphénix, sodyum soğutucusundan kaynaklanan sorunlar nedeniyle kapatıldı. Rusya'da ise, 600 MWe gücündeki BN-600 hızlı üretken reaktörü 1980 yılından beri sürekli devrede. Dolayısıyla, yeniden işleme sürecinden elde edilen plütonyumun hızlı reaktörlerde kullanımı hayli sınırlı. Fazlası biriktiriliyor...

Atıklar: Kullanılmış yakıtın yeniden işlenerek, içeriğindeki uranyum ve plütonyumun ayrıştırılmasından sonra geride, kullanılmış yakıtın tonu başına 5 m^3 kadar asit çözeltisi kalır. Çözeltide; kılıfı oluşturan zirkonyum alaşımındaki metaller ile, başta Sr^{90}, Cs^{137} olmak üzere fısyon ürünleri, plütonyum ve uranyumun haricindeki 'ikincil aktinitler' bulunmaktadır. Üst düzeyde radyoaktif atık oluşturan bu malzeme, kullanılmış yakıtın kütlesinin %3'üne karşılık geldiğinden, 30 kg civarındadır. Hatta bu miktar, ikincil aktinitlerin de plütonyumla birlikte ayrıştırılıp yakılmasıyla, biraz daha azaltılabilir. Bu amaçla, 'hızlandırıcı güdümlü sistem'ler (ADS) üzerinde çalışılıyor. İkincil aktinitler, CANDU tipi ağır sulu reaktörlerde de, bir dereceye kadar yakılabilir. Ancak hafif sulu termal reaktörlerin yakıtında kullanılmaları sakıncalıdır. Çünkü düşük enerjili nötron spektrumuna tabi tutulduklarında, bazıları fisyona uğrarken, bazıları nötron yutup güçlü radyoaktif çekirdeklere; bunlardan örneğin küriyum (Ci), güçlü bir nötron ışıyıcısı olan kaliforniyuma (Cf) dönüşür ve yakıt döngüsünün arka cephe işlemlerini zorlaştırır. İkincil aktinitler termal reaktörlerde yakılacaksa, element olarak birbirlerinden %99'un üzerinde saflıkla ayrıştırılıp, reaktörün her biri için uygun farklı yerlerine konmaları gerekir ki, bu düzeyde ayrıştırma, pahalı bir işlemdir. Dolayısıyla, ikincil aktinitleri içeren yakıtın hızlı reaktörlerde kullanılması gerekir. Buna 'tüm aktinitlerin yakılma döngüsü' deniyor. Döngünün asıl yararı, atığın miktarını azaltmaktan çok, gözetim altında tutulması gereken süreyi kısaltmaktır. Çünkü bu süre, eğer ikincil aktinitler çözeltiden alınmışsa, geride kalan Sr^{90} ve Cs^{137} çekirdeklerinin yarılanma ömrü 30 yıl civarında olduğundan, kabaca bu sürenin 10 misli, yani 300 yıl kadardır. Aksi halde saklanma süresi, aktinitlerin yarılanma ömrü çok daha uzun olduğundan, 3.000 yılı aşar. Bunca uzun süreler söz konusu olunca, depolamadan önce, atığın hacminin olabildiğince azaltılması, fiziksel hareket ve kimyasal tepkime yeteneğinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu amaçla cam tozuyla karıştırılıp eritilir ve paslanmaz çelikten varillere aktarılarak saklanırlar. Batıda kullanılan cam tipi, borosilikat. Rusya'da ise fosfat camı...

TAŞIMA PU'YLA BOMBA OLMAZ

Nükleer santrallerdeki plütonyum, atom bombası yapımı için uygun nitelikte mi?

Nükleer bir santralde üretilen plütonyum Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 izotopları halinde ortaya çıkar. Bunlardan çift sayılı izotoplar kolay fisyona uğramayan, dolayısıyla parçalanabilir olmayan izotoplar. Tek sayıda olanlarsa, yani Pu-239 ve Pu-241, fisyona yatkın izotoplar. Ama nükleer reaktörde bu iki tür bir arada bulunduğundan, yakıt kirlidir. Bomba malzemesi yapmak için çift sayılı izotopların ayıklanması gerekir. Bu da oldukça teknik ve bir hayli pahalı zenginleştirme işlemleri gerektirir. Öte yandan aynı yakıt kompozisyonunu, araştırma reaktörlerinin yakıtından elde etmek de mümkün. Dolayısıyla bomba malzemesi yapmak amacıyla nükleer güç santrallerine yönelmek hiç de akılcı bir yol değil.

Nükleer enerji reaktörleri ve araştırma reaktörleri arasındaki nitelik farkı nedir?

Nükleer enerji santralleri boyut olarak daha büyük olduklarından, görece az düzeyde zenginleştirilmiş uranyum kullanırlar. Bunun anlamı, yakıtın çok büyük kısmının parçalanamaz U-238 izotopundan, yalnızca %l,5-%3'lük kısmının parçalanabilir U-235 izotopundan oluşuyor olması. Halbuki araştırma reaktörleri çok daha küçük hacimli olduklarından, çok daha zengin yakıt kullanmak zorundadırlar. Yani yakıtın yaklaşık %98-%99'a varan bir kısmı parçalanabilir U-235 izotopundan oluşur. Böyle bir reaktörün yakıtını doğrudan uranyuma dayalı bir bomba yapmak üzere kullanmak mümkün olabilir.

Bu iki reaktör tipi arasında güvenlik önlemleri açısından bir fark var mıdır?

Her iki tür reaktörün de yakıt denetimi aynı kriterlerle yapılmaktadır. Yani güvenlik açısından enerji santrali ve araştırma reaktörünün yakıtı aynı denetim sürecinden geçer, aynı şekilde sıkı kontrol altındadır.

O halde kamuoyunda, araştırma reaktörlerinden kaynaklanan bir tehdit olmadığı, buna karşılık enerji santrallerinin ciddi bir tehdit unsuru olduğu şek-

lindeki yaygın kaygının sebebi nedir?

Bomba yapımı açısından nükleer enerji santrallerinden duyulan endişenin, araştırma reaktörlerine oranla daha yüksek olması tamamen irrasyonel bir kanaattir. Bence bu kanaat, enerji santrallerinin kamuoyunda ön planda tartışılır olmasından kaynaklanıyor. Örneğin, dünyada üretilen nükleer malzemenin yarısına yakını askerî amaçlıdır. Ama askerî amaçlı radyoaktivite kaynaklarına yönelik bir gösteri veya eleştiri pek duymuyoruz. Bu endişeler ve eleştiri silsilesi enerji reaktörleri üzerine odaklanmış durumda. Nükleer enerji santrallerini kamuoyu nezdinde ön plana çıkartan birkaç ciddi kaza var, örneğin Çernobil veya daha ufak ölçekli diğer kazalar.

Araştırma reaktörleri enerji üretmedikleri için bu tür kazaların olasılığı zaten çok daha düşük. Bir ikincisi, askerî uygulamalarda bu tür radyasyon kazaları çok kolay örtbas ediliyor. Zaten kamuoyu koridorları dışında gerçekleşen olaylar silsilesi oldukları için, bunların pek çoğunu kamuoyu öğrenemiyor bile denebilir. Enerji santrallerinin endişeler açısından ön plana çıkmasının nedeni bu olsa gerek.

Üretken (*breeder*) reaktör nedir?

Üretken reaktör, tükettiğinden fazla parçalanabilir çekirdek üretebilen reaktör anlamına geliyor. Bir çelişki gibi geliyor ilk anda. Tükettiğinden fazlasını nasıl üretir? Bunun bir örneği, üretken reaktör yakıtı uranyum-235/uranyum-238 karışımıdır. U-235 çekirdeği, parçalanabilir yapıdadır. Bir nötron isabet ettiğinde, parçalanıp enerji açığa çıkarır. U-238 çekirdeği parçalanamaz. Bir nötron yuttuğunda U-239 olur, daha sonra da iki beta bozunmasına uğrayarak elektron atıp, plütonyum-239'a dönüşür. Plütonyum-239 çekirdeği de parçalanabilir yapıdadır. Yani parçalanabilir olmayan U-238, parçalanabilir olan Pu-239'a dönüşür. Öte yandan parçalanabilir olan U-235, parçalanıp kaybolur. Eğer kullandığınız, yani parçaladığınız, U-235'den çok Pu-239 üretebiliyorsanız birim zaman içinde, yakıtınız sürekli olarak artıyor demektir. Üretken reaktör bu. Başka yakıt pozisyonları örnekleri de mevcut.

Üretken reaktörde üretilen Pu-239, bomba yapımında kullanılabiliyor mu? Yani bu Pu-239, enerji santrallerindeki kirli Pu-239'a göre daha mı temiz?

Şimdi burada üretken santrallerin ön plana geçmesinin nedeni şu: Hızlı üretken santrallerde yakıtın kendisi başlangıç itibariyle zaten uranyumla plütonyumun karışımıdır. Harman üretken reaktörde plütonyumun yanına biraz da uranyum katıp hızlı üretken reaktöre koyuyorsunuz. Hızlı üretken reaktörde bomba malzemesi olarak plütonyuma yönelirseniz yapacağınız şey kimyasal ayrımdır. Bu kolay birşey. İzotop zenginleştirme de söz konusu. Nerede söz konusu? O plütonyumun hepsi *bomb-grade*'dir, yani bomba yapımına uygun zenginliktedir. Ama kalite farkı vardır. Eğer içinde çift sayılı izotoplar az veya çoksa, kalitesi düşük veya yüksektir. Hatta çift sayılı izotopların bolluğu, plütonyumu bomba malzemesi olarak kirli hale getirir denir. Kirlidir, temizlenmesi gerekir. Yani o çift sayılı izotopların ayrılması lâzım ki, bomba "puf" demesin, "bum" diye patlasın; teknik deyişle, o mikrosaniye düzeyindeki zaman biriminde yeterince enerji verimi alabilesiniz, yeterince çok sayıda çekirdeği fisyona uğratıp o ani patlamayı başarabilesiniz. Eğer yüksek kaliteli bomba malzemesi istiyorsanız, her durumda bir reaktörden alacağınız plütonyumda bir izotop ayrım süreci gereklidir eğer yüksek kaliteli bomba malzemesi istiyorsanız.

Nükleer karşıtı özel kuruluşlar, kaçakçılık olaylarıyla ilgili raporlar yayınlıyorlar. Bu özel kuruluşlar, ne kadar güvenilir?

Benim şu an anımsayabildiğim, nükleer silahların yayılmasına örnek teşkil edebilecek en ciddi olay, Irak'ın girişimi. Yani Saddam'ın bir araştırma reaktöründe şekillendirdiği çabalar. Ama bu çalışma bir bomba yapımının ne kadar uzağında ya da yakınında, onun hakkında bir bilgiye sahip değiliz. Dolayısıyla anlatılanların ve iddiaların, bence, ne derece doğru olduğu da kuşkulu. Çünkü benzeri nonproliferasyon alanında bir İsrail örneği var. İsrail için bombasını yaptı deniyor. Gerçi denemesini belki Güney Afrika'da, eski ırkçı rejimle bir işbirliği çerçevesinde gerçekleştirdi, belki de hiç gerçekleştirmedi. Bunun dışında bir Hindistan örneği var. Zaten NPT'ye (Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması) üye olmayan bir ülkeydi; yapmakta kararlıydı, yaptı. Pakistan keza. Ama bu nükleer silah, kafaya konulduğunda ve gerekli kaynaklar odaklandığında başarılamayacak bir teknoloji zaten değil.

NPT'ye (Nükler Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması) üye olmak tezgâh altında bomba yapımına karşı yeterince bir güvence mi? NPT'ye üye olmamak yerinde denetim konusunda bir rahatlık sağlıyor mu?

NPT'ye üyeyseniz, birtakım kolaylıklardan yararlanıyorsunuz. Örneğin, Türkiye'nin aldığı yardım. "Barış için atom" sloganı çerçevesinde, Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi kuruldu. Oradaki anlayış şu: Biz size nükleer enerjiyi barışçıl amaçlarla kullanmakta yardımcı olalım, ama siz de başka amaçlara sapmamayı taahhüt edin. Bunun karşılıklı bir denetimi oluyor; bütün tesisleri kapsayan bir denetim.

Sadece bu araştırma reaktörleri değil, tüm diğer etkinlikler de kollanıyor yerinde olarak. Başka türlü uzaktan denetim olanaklarınız yine var ama, her şeyi izleyip kollayamıyorsunuz. Ne de olsa bir dereceye kadar serbestiye kavuşmuş oluyorsunuz. Bir de uluslararası hukuk çerçevesinde devlet olarak taahütünüzü çiğnememiş oluyorsunuz. Onun da bir ağırlığı var elbette.

Türkiye bir NATO üyesi; taahhüt etmiş; ağzından çıkmış ve askerî açıdan olsun, ekonomik açıdan olsun yardım alıyor. Türkiye'nin bu ihtiyaçları olmasa bile, devletin sürekliliğinin, uluslararası alanda inanılırlığının, güvenilirliğinin devamı açısından bir taahhüdünü çiğnememesi çok önemli bir olaydır. Bunu yapan çok az sayıda devlet vardır. Bunlar da büyümeden yok olmuş devletlerdir denilebilir. Türkiye gibi, İran gibi köklü devlet geleneği olan toplumlarda olacak iş değil. Köklü devlet geleneği olan toplumlar için bu tür girişimler, çok olağanüstü ara rejimlerin belki atabileceği ve çok kısa zamanda tersine döndürülmeye mahkûm olan adımlardır.

Bir ülkeden şüphelenildiğinde, ilk olarak araştırma reaktörlerine bakılıyor. Araştırma reaktöründe ne kullanılıyor?

Araştırma reaktörleri küçük boyutlu oldukları için, çok daha zengin yakıt kullanmak durumundadır. Ya fakir yakıt kullanıp büyük kalp (*core*-tepkime odası) yaparsınız, ya da zengin yakıt kullanıp, küçük kalp yaparsınız. Araştırma reaktörleri enerji üretmeyecekleri için zaten küçük olmak durumunda. O zaman kritik kütleyi sağlamak için zengin yakıt kullanmak durumundasınız. Örneğin %99 U-235, %1 de U-238 diyelim. U-238 zaten zamanla plütonyuma dönüşecek. O plütonyumu alıp kullanabileceğiniz gibi, %99 oranındaki U-235'i kullanarak uranyum bombası da yapabilirsiniz. Eğer sizin aklınızda bomba fikri varsa, gidip bir enerji santrali kurmazsınız; bu birkaç milyar dolarlık iş. Bir araştırma reaktörü peşinde olursunuz; yani birkaç 10 milyon dolarlık iş. Maliyeti daha düşük olur, bir de alacağınız yakıt zaten doğrudan kullanıma yatkın bile olabilir.

Peki araştırma reaktörlerinde üretilen ürün nedir? İzotoplar mı?

Genellikle mühendislik kollarında, güç düzeyi sıfıra yakın bir reaktör nasıl çalışır, onu araştırıyorlar. Nötron dağılımları, radyoizotop üretimi inceleniyor. Tıbbi uygulamalara yönelik olarak radyoizotop üretilebiliyor. Fizik deneyleri yapılıyor, nötron kaynağı olarak kullanılıyor, çünkü diğerlerinden sızıyor. Nötronların sonuçta belli bir ömrü var. Örneğin serbest nötronun mesela dakika düzeyinde bir ömrü var.

En düşük enerji grubundaki nötronlardan olan termal nötronların bile hızı 2200 m/s. Yani bu nötronlar 25°C sıcaklıkta, saniyede 2,2 km yol kat ediyor. Yani gözünüzü açıp kapayıncaya kadar o Çekmece'den çıkıp Yeşilköy'e gidiyor. Duvar dediğim de tabii havuzun içindeki duvar. Yoksa reaktörün duvarı değil. Reaktörün duvarının dışındaki radyasyon düzeyi, yol üzerindeki korunma tedbirleri, yutucu çekirdekler nedeniyle normal radyasyon düzeylerinde olmak zorunda. Bu duvar kurşun ağırlıklı beton, yani kurşun karıştırılmış beton olabilir. Reaktörün kendi içinde, zincirleme reaksiyonu kontrol altına almak için kobalt kullanılır. Güçlü bir yutucudur ama, pahalı olduğu için duvarlara konmaz. Daha çok kurşun kullanılır. Reaktör yakıt kafesinin etrafı kurşundur. Reaktör binasının dışındaki nötron düzeyi izin verilebilir sınırların altında olmak zorundadır. Ama havuzun içindeki reaktörün duvarında, hatırı sayılır miktarlarda nötron düzeyi akışı vardır. Hatta havuzun mavi rengi de nötronların çarpıştığı protonların, yani hidrojen çekirdeklerinin yaydığı radyasyondan oluşur. Konik konik maviler... Aslında o koninin ucunda bir proton seyahat ediyordur; ivmelenmeye tabi olduğu için de zorunlu olarak radyasyon yayıyordur. Bu o ışıktır. Her bir koninin ucunda bir proton vardır. Özetle, bomba yapmak istiyorsanız araştırma reaktörü tavsiye edilir. Yakıtı daha zengindir, kendisi daha ucuzdur. Bir bomba yapmak için gereken miktarlar 7-8 kg dır. Tabii araştırma reaktörünüz ciddi bir denetim altında. Toplam yakıtı ne kadar? Diyelim 100 kg. 100 kg'dan çaktırmadan 7 kg çalmak zordur. Ama bunu 10 yıl boyunca yapabilirsiniz, günde 1-2 gram bir köşeye saklayarak. Çünkü bu maddelerin fire payları da var; olmak zorunda. Gerçekten de, yakıtı bir yere koyuyorsunuz, alıyorsunuz, koyduğunuz yere az miktarlarda yakıt bulaşıyor, dolayısıyla ağırlıktan bir kaybı var. Ancak bu fire payları içine 7 kg'ı kısa süre içinde gizlemek, 100 kg'lık bir yakıt stokunda ya da birkaç yüz kiloluk yakıt stokunda, çok zor.

Türkiye, İran ya da Irak gibi ülkelerin "bodrumda" bir araştırma reaktörü yapmaları mümkün mü?

Amacınız "bodrumda" bir araştırma reaktörü yapmaksa, o zaman CANDU yapacaksınız. Bu tip reaktörlerde zenginleştirilmemiş yakıt kullanılır: doğal uranyum. Yani eğer ben zenginleştirmeden yakıt yapayım derseniz, CANDU tipi bir reaktör uygun. Çünkü bir enerji santrali için, hatta bir araştırma reaktörü için zenginleştirme yapmak zorundasınız. Kilolarca yakıtı zenginleştirmek, çok pahalı bir iştir. Miktar arttıkça, gaz difüzyon (ayrıştırma) tekniklerine yönelmek durumundasınız. Bu da çok büyük tesisler gerektirir. Yaklaşık 4000 MW elektrik gücüyle desteklenmesi gerekir. Yok ben zenginleştirmeden doğal uranyumdan (şans eseri doğal uranyumunuzun olduğunu düşünelim) yapayım derseniz CANDU tipi reaktöre yönelmeniz şart. O zaman da ağır su teknolojisine sahip olmanız gerekiyor. Orada da o zorluk var. Ağır su da nedir? Hidrojen yerine döteryum kullanımı. Orada da izotop zenginleştirme işi var. O da kolay iş değil. Ama kafaya koyduktan sonra, eğer doğal uranyum kaynaklarınız varsa, yaparsınız. Örneğin, Ziya ül Hak bu iş için, "halkım ot yese de ben bu bombayı yapacağım" dedi. Ot yedirdi, yaptı. İyi mi etti, o tartışılır. Ama yanıbaşınızda öyle ciddi bir tehdit olunca, paranoya içinde yaşıyorsanız, halk da ot yemeye razı oluyor. Bir de üzerine alkışlıyor.

Bir de saçma sapan gurur sembolleri var dünyada. Yani geçmiş yüzyılın kamuoyu psiklojisinde yarattığı tahribat o kadar derin ki, olmayacak şeyleri statü sembolü olarak görüyoruz.

Dünya genelindeki nükleer madde trafiğinde, tam güvenlik sağlanması mümkün mü?

Tam güvenlik diye birşey olamaz. Güvenlik konusunda risk analizleri de söz konusu. Sizin aklınızdaki olay, mesela 100 yılda bir yer alabiliyorsa, bunu ciddi bir tehlike olarak nitelendirebilirsiniz. 100 yıl bir toplum hayatına, hatta insan hayatına bile sığabilen bir süre. Ama milyar senede birse, ona karşı tedbir almak, ancak ucuza mal olan bir seçenekse mümkündür. Başka unsurları da göz önüne almak lâzım. Bu ne yazık ki kamuoyunda pek irdelenmiş, anlaşılmış bir mesele değil aslında. Şimdi diyelim ki iki tane tehdit unsurunuz var. Birisi trafik kazaları, diğeri radyasyon tehlikesi. Trafik kazalarında Türkiye'de yılda 60.000 kişi ölüyor veya sakat kalıyor. Elinizde tek bir liranız var; ya bu işe yönelteceksiniz, ya diğerine. Hangisine yöneltirsiniz? Bu tek lira, kişi başına ölüm olasılığı hangi tehditte yüksekse ona yöneltilmeli. Tabii ya hep, ya hiç yaklaşımı da doğru değil. Genellikle tehdit kaynaklarının bir dağılımı söz konusudur. Beş liranız var diyelim, üçünü bir tarafa, ikisini bir tarafa. Bu miktarları nasıl ayarlarsınız: Harcadığınız para başına, ne kadar hayat kurtaracağınızı dikkate alarak. Yani daha ciddi risklere, daha fazla kaynak ayırmak durumundasınız. Ta ki bileşik kaplar yasasına göre, iki kaynaktan gelen risk eşit oluncaya kadar. Ama öyle yapılmıyor maalesef. Trafik kazaları meydan muharebesi gibi seyrederken, tutup radyasyona karşı, yahut kamuoyunun hassas olduğu farklı konularda çok daha büyük kaynaklar harcanıyor. Örneğin, bazı iddialara göre ABD, radyasyon tehlikesine karşı yılda bir hayat kurtarmak için yaklaşık milyon dolar harcıyor. Ama bazı mühendisler de, "ben otoyollarda alacağım fazladan güvenlik önlemleriyle, her beş bin dolara bir hayat kurtarabilirim" diyor. Ama ABD, o beş bin doları oraya harcamıyor. Dolayısıyla ne olmuş oluyor? Bu alanda bir hayat kurtarmak için 1 milyon dolar harcarken, diğer alanda 200 hayatı gözden çıkarmış oluyorsunuz. Bu akılcı bir seçim değil. Ama tabii bütün riskler ölmek veya ölmemek şeklinde de değil. Bunun aslında daha rafine ölçüsü, insan günü, yani hayatından azalan gün sayısıdır. Ya da ilave edebildiğiniz gün sayısı üzerinden çalışırsanız, çok daha akılcı bir öncelikler sıralaması yakalamak ve kaynakları ona göre kullanmak mümkün olur. Yoksa hiçbir ülkenin bütün risklere karşı mutlak güvenlik sağlayacak kaynağı yoktur.

Bir de azalan getiriler kuralı diye bir şey var tabii. Örneğin güvenlik. Herhangi bir konuda güvenliği %50'den %90'a çıkarmak için 1 milyon dolar harcıyorsanız, %90'dan %92'ye çıkarmak için yine 1 milyon dolar harcamanız gerekir. %92'den %93'e çıkarmanız için 10 milyon dolar harcamanız gerekir, %93'den %98'e çıkarmak içinse 1 milyar dolar. Yani maliyet katlanarak artar. O mutlak güvenlik dediğimiz sahaya yaklaşmak için de genellikle sonsuz kaynak gerekir.

Ortadoğu'da nükleer açıdan güvenli ve istikrarlı bir ortam oluşturmak mümkün mü, yoksa bu fikir bir fantaziden öteye gidemez mi?

Şimdi mevcut koşullar altında, mesela yeterince kaynak harcansa, bu dünyanın, Avrupa Birliği'nin, Birleşmiş Milletler'in en öncelikli sorunu olarak görülse, belki bu mümkün olabilir. Ama bir veya başka nedenle bu böyle değil, böyle olacağı da yok. Mesela Fransa Irak'a askerî malzeme satıyor. Irak'a reaktörü götüren Fransa. Yani onların güvenli ve istikrarlı bir ortam oluşturmak gibi bir derdi yok aslında. Ama varsayalım oldu. Bu güvenliği, örneğin bahsettiğimiz gizemli ölçekte, %90'a çıkarmak için gerekecek miktar yüzlerce milyar dolar olacaktır.

GERÇEK CASUSLUK ÖYKÜSÜNÜN ARDINDAKİ MADDE
POLONYUM 210

Alexander Litvinenko, eski KGB görevlilerindendi. Sovyetler Birliği'nin dağılmasından sonra, Rusya Federasyonu Güvenlik Kuruluşu'nda (FSB) çalıştı. Devlet sırlarını açıklamakla suçlanınca, sahte bir pasaportla Türkiye'ye kaçmıştı. 1 Kasım 2000'de, Londra'ya geçip, İngiltere'den iltica talebinde bulundu. O günden sonra Londra'da yaşıyordu. 1 Kasım 2006 günü Millenium Otel'de, eski çalışma arkadaşlarından Dmitry Kovtun, Andrei Lugovoi ve Vyacheslav Sokolenko ile buluştu. Otelin dördüncü katındaki Pines Bar'da kahve içtiler. Litvinenko aynı gün daha sonra, Picadilli alanındaki bir suşi lokantasında, İtalyan güvenlik uzmanı Mario Scaramella ile öğle yemeği yedi. Ertesi gün rahatsızlanmıştı. 3 Kasım günü Barnet General Hospital'a kaldırıldı. 11 Kasım'da zehirlendiği anlaşılmıştı. 17 Kasım'da, University College Hospital'a nakledilerek, silahlı muhafızların koruması altına alındı. Bir toksikoloji uzmanı tarafından kendisine 'talyum zehirlenmesi' teşhisi kondu. 20 Kasım'da yoğun bakıma alındı. Kendisine iki kez, talyumun vücuttan atılışını hızlandırmak amacıyla 'Prusya mavisi' enjeksiyonu yapıldı. Halbuki 22 Kasım'da durumu ağırlaşmıştı. Ertesi sabah öldü. Talyumla değil, güçlü bir alfa ışınetkin (radyoaktif) maddeyle zehirlendiği anlaşılmıştı. İngiliz polisi tarafından aynı gün, olay hakkında soruşturma başlatıldı.

Litvinenko'nun 1 Kasım günü uğramış olduğu yerlerde alfa ışınımı taraması yapıldı. Millenium Otel'in dördüncü katındaki kahvede Po^{210} (polonyum) belirlendi. Ancak, Litvinenko daha önce zehirlenmiş ve ışınetkin maddeyi buraya, kahve içerken bulaştırmış olabilirdi. Cebinden 1 Kasım tarihli eski bir otobüs bileti çıkmıştı. Otobüs bulunup tarandı. Işınetkinliğe rastlanmayınca, Litvinenko'nun otelde zehirlenmiş olduğu kanaatine varıldı. Litvinenko'nun otelden sonra uğramış olduğu yerlerin hepsinde taramalar yapıldı. 28 Kasım günü Scotland Yard tarafından, başta suşi (Japon mutfağından ince dilimlenmiş çiğ balık) lokantası ve evi olmak üzere, yedi ayrı yerde ışınıma rastlandığı açıklandı. O halde Litvinenko'nun vücudundaki etkinlik çizgisi otelde başlıyordu. Etkinliğin izlerinin, polonyumu otele getirenler tarafından da bırakılmış olması gerekirdi. Çizginin öte yanının araştırılmasına başlandı. Otelde buluştuğu eski çalışma arkadaşlarının Londra'ya geliş ve gidiş yolları saptandı. Dmitry Kovtun, Londra'ya 30 Ekim tarihinde, Hamburg'tan uçakla gelmişti. İngiliz Sağlık Koruma Kuruluşu (HPA) 29 Kasım günü, İngiliz Havayollarının iki uçağında polonyuma rastlandığını açıkladı. Bu bulaşmadan dolayı, o günden sonraki 221 sefer etkilenmiş olabilirdi. Bu uçuşların 30.000 yolcusuna, güvenlik taraması için kuruma başvurmaları gerektiği bildirildi. 1 Aralık günü Litvinenko üzerinde otopsi yapıldı. Midesinde Prusya mavisi enjeksiyonlarının kalıntılarının yanında, yüksek dozda Po^{210} belirlendi. Scotland Yard'ın 6 Aralık'ta yaptığı açıklama, Litvinenko'nun ölümünün bundan böyle cinayet kapsamında soruşturulacağını bildiriyordu.

8 Aralık günü Moskova'dan, Dmitry Kovtun'un rahatsızlandığı haberi geldi. Komada olduğu söyleniyordu. Alman polisi, Kovtun'un Londra'ya uçarken uğradığı Hamburg'da arama yapmıştı. Burada kaldığı dairede polonyum bulundu. Kovtun hakkında, "Almanya'ya kaçak olarak ışınetkin madde soktuğu" gerekçesiyle dava açıldı. İngiliz polisi ertesi gün, Millenyum Oteli'nin Pines Bar'ındaki tek bir fincanın, zehrin Litvinenko'ya verilmesinde kullanılan araç olduğunun, hemen hemen kesinlikle belirlendiğini açıkladı. Soruşturma devam ediyor. Bu arada bir dizi soru doğmuştu: Neden önce "talyum zehirlenmesi" denmiş de, zehrin polonyum olduğu baştan belirlenememişti? Suikastçılar her kim idiyseler, neden böyle her tarafta kalın izler bırakan bir yöntemi seçmişlerdi?

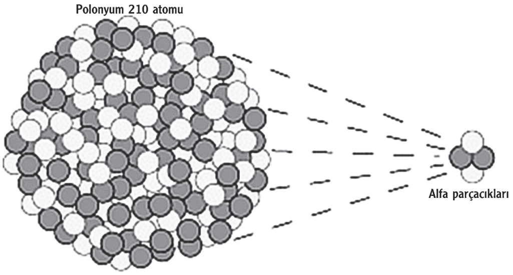
Bu yazımızda, olayın teknik yönlerine ışık tutacak bir derleme hazırlamaya çalıştık...

POLONYUM

Polonyum elementi 1897 yılında, Marie Sklodosvska ve eşi Pierre Curie tarafından keşfedildi. Curie'ler aslında uranyumun, 1896 yılında Henry Becquerel tarafından keşfedilmiş olan ışınetkinlik özelliğini inceliyorlardı. Bu amaçla, uranyumun 'piçblend' mineralini kullandılar. Mineralin içinde, uranyum ve toryumun bulunduğu ve her ikisinin de ışınetkin olduğu biliniyordu. Çünkü uranyum elementi çok daha önceleri, 1789 yılında, toryum ise 1828 yılında saf olarak ayrıştırılmışlardı. Curie'lerin ilgi odağı, bu iki elementin ışınetkinlik düzeylerini ayrı ayrı belirlemekti. Ancak, belli bir mineral örneğinin ışınetkinliğinin, bu örnekten kimyasal yöntemlerle ayrıştırdıkları uranyum ve toryumun ışınetkinliklerinin toplamından daha fazla olduğunu fark ettiler. Bu, mineral örneğinin içinde, ışınetkin başka bazı elementlerin daha olması gerektiğine işaret ediyordu. Nitekim, mineralden uranyum ve toryumun ayrıştırılmasından sonra geride kalan örneklerin ışıma spektrumunda, o zamana kadar bilinmeyen bir elementin imzasını yakaladılar. Kısa bir süre sonra da, elementi saf olarak elde etmeyi başardılar. Marie Curie, Polonya'dan göç etmiş bir Fransız vatandaşıydı ve o sıralar ülkesi, Rusya, Prusya ve Avusturya arasında paylaşılmış durumdaydı. Uluslararası camianın dikkatini ülkesinin bağımsız olmayışına çeker ümidiyle, bu yeni elemente 'polonyum' adı verilmesini önerdi. Önerisi malum, kabul gördü. Uranyum cevheri üzerindeki çalışmalarına devam ederek 1902 yılında radyumu saf olarak elde ettiler.

Polonyumun geç keşfinin nedeni, yerkabuğunda eser miktarlarda, örneğin uranyum minerallarinde kütlece 10 milyarda bir oranında bulunması. Atom numarası, yani proton sayısı 84. Hepsi de ışınetkin olan 28 adet izotopu var. Bu izotopların kütle numaraları 194 ile 218 arasında değişiyor, yarı-ömürleri ise nanosaniye ile birkaç yıl arasında. Polonyumun yerkabuğunda-ki azlığının nedeni de bu zaten; kararlı izotopunun bulunmaması ve ışınetkin izotoplarının kısa ömürlü olması. Dünya'nın oluştuğu sıradaki bileşiminde bazıları vardı belki, ama çoktan bozunup başka çekirdeklere dönüşmüş olmalılar. Sonuç olarak, polonyum şimdiki doğal varlığını, diğer elementlerin ışınetkin izotoplarının bozunma ürünlerine borçlu. En yavaş bozunan izotoplarından birisi Po^{210}, 138 gün yarı-ömüre sahip. Fakat bu izotop, garip bir şekilde, doğada bulunmuyor. Halbuki en yaygın olarak kullanılanı, en tehlikelisi ve şu sıralarda da en ünlüsü o...

Po^{210} alfa parçacığı ışıyarak bozunuyor. Alfa parçacıkları, +2 yüklü helyum çekirdeklerinden oluştuklarından, yolları üzerindeki atomların - yüklü elektronları ve + yüklü çekirdekleriyle güçlü elektrostatik etkileşime girer ve bu atomları iyonlaştırıp, yerlerinden oynatıp; aralarında molekül bağları varsa eğer, bunları kırarlar. Sonuç olarak, bozunmaların içinde yer aldığı malzemenin atomlarına kinetik enerji aktarılarak, malzemenin ısınmasına yol açılmaktadır. Her bir bozunmadan açığa çıkan enerji 5,06 milyon elektronvolt (MeV) kadardır. Gerçi 1 eV, bizim büyük ölçeğimiz için çok küçük miktarda bir enerji ($1eV=1,6x10^{-19}$ J). Fakat, örneğin 1 gram Po^{210}'da yer alan 'saniyedeki bozunma sayısı' (*Becquerel, Bq*), yaklaşık olarak 5 kg radyumunkine eşdeğer. Radyumun gramının saniyedeki bozunma hızı



3,7x10^9 olup, bu ışınetkinlik düzeyi 1 Curie olarak tanımlanmış. O halde 1 gram Po^{210}'un ışınetkinliği, yaklaşık 5.000 Curie'ye, ya da 1,85x10^{14} Bq'e (1 trilyon, 850 milyar Becquerel) eşit. Bu bozunmalardan açığa çıkan enerji miktarı 140 Joule'ü (J) buluyor. Bu, 1 gramlık Po^{210} örneğinin ışıma gücünün 140 W olduğu anlamına gelmekte. Yani Po^{210}, birim ağırlık başına ısı üretme gücü yüksek bir madde. Bu özelliğiyle, hafif güç kaynaklarının, örneğin ısı-elektrik dönüştürücüsü (termoelektrik) hücrelerin yapımında ve yapay uydularda kullanılıyor. Nitekim, Ay'a indirilen Lunokhod gezginlerinin (*rover*) iç bileşenlerinin Ay gecelerinde donmaması için bu kaynak kullanıldı. Öte yandan, alfa parçacıkları, içinde seyahat ettikleri havayı iyonlaştırıp, civardaki statik elektrik oluşumlarının nötürleşmesini sağlayabiliyor. Bu nedenle, 'statik karşıtı' (anti-statik) bazı fırçalarda 500 μCi'ye varan (μCi=mikroCurie), yani 100 ng (nanogram=10^{-9} gram - gramın milyarda biri) düzeyine ulaşan miktarda Po^{210} bulunur. Bu aygıtlar yetkili fotoğrafçılar tarafından film katmanlarında oluşan statik elektriği gidermek amacıyla kullanılmakta. Polonyumun bu izotopu doğada bulunmadığına göre, bu tür gereksinimler için yapay olarak üretilmesi gerekiyor.

P^{210} üretmenin en çok kullanılan yöntemi, Bi^{209} (bizmut) izotopunu nükleer reaktörlerde nötron bombardımanına tabi tutmak. Bir nötron yutan Bi^{209} çekirdeği, β^- geçerek, yani bir elektron ışıyarak P^{210}'a dönüşür. Fakat Bi^{209}, $Tl^2$06'ya (talyum) da dönüşebiliyor. Bu yüzden, üretilen P^{210} örneklerinde talyuma da rastlanır ve talyumun bulunması, P^{210}'nun bu süreçle elde edilmiş olduğuna işaret eder. Hatta, bizmutun elde edildiği mineral, çıkarıldığı madene özgün bazı safsızlıklar içerir. Reaktördeki nötron ışınımı sonucunda bu safsızlıklar, P^{210}'un yanındaki diğer safsızlıklara dönüşür. Bu unsurların kimyasal bileşimini inceleyerek, herhangi bir P^{210} örneğinin hangi ülkede üretildiğini, hatta hammaddesinin o ülkenin hangi madeninden geldiğini belirlemek mümkündür.

Dünyada yıllık P^{210} üretimi 100 gram kadar ve bunun hemen tamamı, Rusya Federasyonu'ndaki RBMK tipi nükleer reaktörlerde üretiliyor ve tek bir yetkili satıcı aracılığıyla, Amerikan şirketlerine satılıyor. Yasa dışı kaynaklardan elde edilmesi güç. Elde edilse bile üzerinde çalışılması zor bir malzeme. Örneğin 1 gramlık P^{210} parçası; bünyesinde bu güçle üretilen ısıyı, doğal taşınımla havaya veya ısı iletimiyle, temasta bulunduğu katılara, aynı hızla aktaramaz. Sıcaklığı giderek artar ve 500°C'ye kadar ulaşır. Halbuki polonyumun ergime noktası 254°C'dir. Dolayısıyla, böyle bir Po^{210} örneği, kendiliğinden erir ve taşınması güç bir hale gelir. Bir başka nedenle daha...

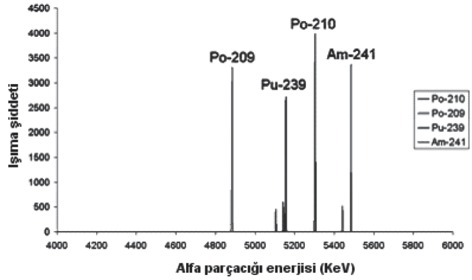
Gerçi polonyumun kaynama noktası 962°C'dir. Fakat çok daha düşük sıcaklıklarda bile, bir polonyum örneğinin yüzeyinden zerrecikler koparak havaya karışır. Bir bakıma buharlaşmaya benzeyen bu 'aerosol' etkisinin, nedeni kesin olarak bilinmiyor. Ancak, dış yüzeye yakın bozunmalardan açığa çıkan alfa parçacıklarının yolları üzerindeki polonyum atomlarından bir grubunu önüne katıp, bünyeden zerrecik halinde kopartarak havaya kattığı sanılmakta. Örneğin 55°C'ye ısıtılan bir polonyum parçası, 45 saat içerisinde kütlesinin %50'sini bu 'uçuculuk' nedeniyle kaybeder. Halbuki Po^{210}'un havaya karışması tehlikeli bir durum...

Alfa parçacıkları civar atomlarla güçlü bir şekilde etkileştiklerinden, özellikle katı malzemelerde fazla mesafe kat edemiyor. Menzilleri milimetrenin kesri kadar ve kâğıt kalınlığındaki bir katı madde tarafından durdurulmaları mümkün. Dolayısıyla, vücut dışında bulunan bir ışınetkin maddeden yayılan alfa parçacıkları, derinin ölü dış katmanını (*epidermis*) geçemez ve metabolizmaya ciddi zarar veremezler. Fakat, eğer ışınetkin madde solunum ya da sindirim yoluyla vücudun içine alınacak olursa, zarar potansiyeli oransız bir şekilde artar. Çünkü, kaynak canlı dokunun içine girdiğinde, parçacıklar kısa bir mesafe içerisinde de olsa, hücredeki moleküllerin yapısında ciddi bozulmalara yol açarlar. En fazla etkilenen işlev, hücre bölünmesi sırasındaki kimyasal haberleşme süreçleridir. Bu süreçler aksadığında, bölünme ölümle sonuçlanır. Dolayısıyla, özelde alfa parçacıkları ve genelde ışınetkinlik, en fazla, çabuk bölünen hücrelerin ölümüne yol açar. Örneğin, kanserli hücreler hızla bölünüp çoğalan hücrelerdir ve ışınetkinlik karşısında, normal hücrelerden daha fazla etkilenirler. Kanser hastalarına 'ışınla tedavi' (radyoterapi) yönteminin uygulanmasının ardında yatan neden bu. Fakat bu sırada, kanserli hücrelerin yanında, ışına maruz kalan sağlıklı hücrelerin bazıları da ölmektedir. Kaldı ki vücutta, sık bölünüp hızlı çoğalan normal hücreler de var. Örneğin mide ve özellikle de bağırsak çeperini oluşturan (mikrovili) hücreler, bir mukus katmanı tarafından korunmalarına çalışılıyor olsa da, asitli bir ortama yakınlıkları nedeniyle kısa ömürlüdürler ve hızlı çoğalmaları gerekir. Kemik iliğinde üretilen kan hücreleri de öyle. Öte yandan, kıldibi hücreleri ışımaya karşı, diğer hücrelere oranla daha fazla duyarlıdırlar. Dolayısıyla, ışınetkin bir maddenin 'kısa sürede' (akut) olarak vücuda alınmasının yol açtığı ilk 'ışıma' (radyasyon) hastalığı belirtileri; saç dökülmesi, bağırsak bozukluğu ve kansızlıktır. Bu semptomların etkinlikle devamı ölümle sonuçlanabilir. Örneğin, her biri aynı doza maruz kalan bir grup insanın %50'sinin ölümüne yol açan doz miktarına "%50 ölümcül doz" (LD50) denir. Po^{210} için bu değer 4 Sievert'tir...

Po^{210}'un alfa ışınlayıcısı olması nedeniyle, ürettiği ısıyla aşırı ısınmayacak kadar küçük bir parçacığı, kâğıt kalınlığında bir maddeyle sızdırmaz bir şekilde kaplandığı takdirde, asla önerilmemekle beraber, cepte dahi taşınabilir. Ancak, aynı parçacığın kabında ufak bir açıklığın oluşması halinde, Po^{210}, aerosol etkisiyle havaya karışmaya başlar ve hem taşıyan, hem de civardakiler için ciddi bir tehdit unsuru oluşturur. Polonyum kimyasal özellikleri açısından tellür ve bizmuta benzediğinden, onların izlediği biyokimyasal patikayı izleyerek dalak ve karaciğerde daha fazla birikmesi beklenir. Dalak 150 g, karaciğer ise 1,5 ila 3,5 kg arasındaki kütlesiyle vücudun küçük birer kısmını oluşturduklarından, belli bir miktar ışınetkin malzemenin bu organlarda toplanması, tüm vücuda yayılmasına oranla daha büyük bir ışınlanma riski oluşturur. Çünkü diğer yandan, polonyumun vücuttan atılış hızı yavaştır. 'Biyolojik yarı-ömrü' 30 ila 50 gün kadar. Bu süre içerisinde, biriktiği organlara ağır zarar verir. Fakat ağır metallerde olduğu gibi, polonyumun da vücuttan atılışını hızlandırmak mümkün. Bunun için, 'panzehir' olarak nitelendirilen 'kıskaçlama unsurları' (*chelating agents*) kullanılıyor. Söz konusu maddelerin molekülleri, ağır metal veya polonyum atomlarını, güçlü bir çift bağla yakalayıp, suyla çözünebilen bir bileşik oluşturur. Hedeflenen atomlar böylelikle, dolaşım sistemine daha büyük miktarlarda karışıp, böbreklerde süzülerek, daha yüksek bir hızla dışarı atılır. Bu maddelerin ilki, I. Dünya Savaşı'ndaki zehirli gaz kullanımına karşı geliştirilmiş olan, kimyasal adıyla "2,3-dimerkaptoproponal", ticari adıyla da 'İngiliz, Lewis-Karşıtı Ajan', yani kısaca 'BAL'dı. Organik bir 'ikili-tiyol bileşiği' olan bu maddenin, 'merkaptan'lar içerdiğinden dolayı, yan etkileri ağırdı. Zamanla ABD'de EDTA, Sovyetler Birliği'nde de DMSA ve DMPS gibi, merkaptan içermeyen seçenekler geliştirildi. Halen Po^{210} panzehiri olarak kullanılan ikili-tiyol bileşikleri; BAL, unitiyol, oxatiyol. Polonyumla birleşerek; vücuttan kolayca atılabilen, kararlı ve çözünebilir birer bileşik oluşturuyorlar. En etkini ve yan etkileri açısından en güvenlisi oxatiyol.

Ancak bir zehirlenme olayının yalnızca semptomlarına bakarak, kökeninin ışınetkin bir madde olduğunu belirlemek, her zaman kolay değil. Çünkü, kimyasal zehir olarak çalışan bazı maddeler de, ‘ışınım hastalığı’nınkilere benzer semptomlar verir. Örneğin, sindirim yolları bozukluğu ortak bir semptom oluşturur. Farelere karşı zehir olarak kullanılan talyum vakalarında, iç kanamalar ve saç dökülmesi de görülür. Dolayısıyla, zehirlenmeye yol açan unsurun ışınetkin bir madde olduğunun saptanabilmesi için böyle bir olasılıktan kuşkulanılması ve o maddenin ışıdığı parçacıkların varlığını belirlemeye yönelik araçların kullanılması gerekir. Halbuki Po^{210}, daha önce kayda geçmiş olan ve ölümle sonuçlanan başka herhangi bir vakası bulunmadığından, ilk akla gelecek olasılıklardan biri değildir. Po^{210}’u etkin bir suikast aracı haline koyan başka bir özelliği daha var...

Alfa ışınlayıcılar genelde, bozunmalarının bazılarında gama ışını da yayarlar. Yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardan oluşan bu ışınlar, alfaların aksine; maddeyle zayıf bir şekilde etkileşir, durdurulmaları görece çok daha zordur. Dolayısıyla, ışınlandıkları ortamda hem uzun mesafeler kat ederler hem de yüksek enerjili olduklarından, varlıklarının belirlenmesi görece daha kolaydır. Kaynak, algılayıcıdan uzakta bile olsa, gama ışınlarının uzun erimi nedeniyle kendisini ele verir. Halbuki Po^{210}’un bozunmalarında, gama ışınlama oranı çok düşük olup, 100.000’de 1 kadardır. Düşük şiddetle ışınlanan bu gama ışınlarının belirlenmesi kolayca mümkün değildir. Dolayısıyla, doğrudan alfa parçacıklarının aranıyor olması ve belirlenmesi halinde, enerji dağılımlarına bakılarak, hangi çekirdek veya çekirdekler tarafından ışınlandıklarının anlaşılmaya çalışılması gerekir. Halbuki ısınan alfa parçacıklarının çoğu, kaynak olan malzemenin kendisi tarafından durdurulmaktadır. Bu yüzden, belirleme işlemi için, özel aygıtların kullanılması gerekir. Örneğin ‘alfa spektrometresi’ düzeneğinde; kaynak olduğundan kuşkulanılan malzemeden bir örneğin sulu bir çözeltisi oluşturulup, metal bir disk üzerine yayılarak buharlaşmaya bırakılır. Amaç diskin üzerinde ince bir katmanın kalmasıdır ki, ısınan alfa parçacıkları bu ince katman tarafından durdurulmasınlar ve diske doğru bakan bir algılayıcının penceresine kadar ulaşmayı başarıp kayda geçirilebilsinler. Bir diğer seçenek, ‘ışıldama’ (*sintillasyon*) sayımına dayalı bir spektrometre kullanmak. Bu düzenekte, örneğin sulu çözeltisi, ışıldama sıvısıyla karıştırılır ve alfa parçacıklarının yol açtığı parıldamalar izlenip, şiddetlerine göre kaydedilir. Her iki düzenekte de sonuç olarak, kaydedilen alfa ‘darbelerinin, enerjilerine göre sayısından oluşan bir grafik inşa edilir. Bu,



bir 'alfa ışınım spektrumu' oluşturur. Yandaki şekilde, Po^{210} dahil üç ayrı izotopun, imza niteliği taşıyan ışınım çizgileri görülüyor. Oluşan grafiğin çizgilerinin enerji konumlarına bakarak, ışınetkin maddenin hangi çekirdek veya çekirdeklerden oluştuğu, hatta çizgilerin yüksekliklerinden hareketle, örnek içindeki yoğunluklarının oranlarını, hatta elde başvuru ölçümleri varsa eğer, mutlak miktarlarını belirlemek mümkün.

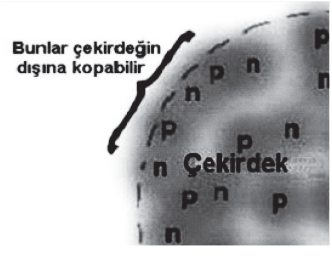
Normal olarak soluduğumuz havada, yerkabuğundaki veya içinde yaşadığımız binaların betonlarındaki uranyumun bozunması sonucunda oluşan radon gazının bozunmasıyla oluşan bir miktar Po^{210} bulunur. Bir insanın sindirim yoluyla alabileceği Po^{210} miktarı için güvenlik sınırı 6,8 pg (pikogram=10^{-12} gram - 1 gramın trilyonda biri) düzeyinde. Tek bir Po^{210} çekirdeğinin bozunmasının yol açtığı 'ışıma dozu', sindirim yoluyla alınırsa 0,51 µSv (mikroSievert), solunum yoluyla alınırsa 2,5 µSv'tır. Yani ölümcül dozu oluşturan 4 Sv; sindirim yoluyla alınan 50 ng (ng=10^{-12} gram) veya solunum yoluyla alınan 10 ng'a eşdeğerdir. Dolayısıyla solunum yoluyla alınan 1 gram Po^{210}, kuramsal olarak 100 milyon insanı zehirleyip, bunların %50'sini öldürebilir. Kişi başına 100 ng'ı (nanogram=gramın milyarda biri) ise, kesin ölüm getirir. Halbuki Litvinenko'ya verilmiş olan miktarın miligram düzeyinde olduğu sanılıyor. Yani 'ölümcül dozun' 10.000 katı...

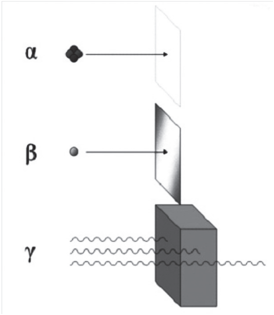
Gerçi doğada 'kusursuz bir cinayetin işlenemez' olduğu söylenir. Ama, 100 ng'lık bir kapsül söz konusu olsaydı, aynı akıbete yol açacak olan semptomlar çok daha yavaş gelişir ve bu kadar dikkat çekmezdi. Semptomlar ağırlaştığında, aylarca sonra, ışınetkinlik hayli azalmış olurdu. Gerçi, ışınım zehirlenmesinden kuşku doğması halinde, bu bir otopsiyle hâlâ anlaşılabilirdi. Fakat, sorumluların geride bıraktıkları izler zayıflamış olacağından, takiplerinin süreci büyük olasılıkla çıkmaz sokaklara varırdı. Bu vakanın doz hesabında bir hata yapılmış. Araç amaca uygun seçilmiş olmakla beraber, icraatı kötü...

IŞINETKİNLİK

Bazı çekirdekler kararsız olup, bir veya birkaç parçacık ışınlayarak, daha kararlı bir enerji durumuna geçmek eğilimindedirler. Böyle çekirdeklerin ‘ışınetkin’ (*radyoaktif*) olduğu söylenir. Doğada karşılaşılan türden ışınetkinliklerden kaynaklanan parçacıklar; nitelikleri zamanında bilinmediğinden, Grek alfabesinin ilk harfleriyle; α (alfa), β (beta), γ (gama) parçacıkları olarak adlandırılmış. Bu isimler hâlâ kullanılıyor. Örneğin α parçacıkları, +2 yüklü helyum çekirdeklerinden oluşmakta. Bunları ışıyan ve α-etkin olarak adlandırılan çekirdeklerin atom numarası, (Z), 2, kütle numarasıysa (A), 4 azalır. Yani çekirdek parçalanır. Beta parçacıklarıysa, -yüklü elektronlar ya da + yüklü pozitronlardan oluşmaktadır. Dolayısıya, β etkin çekirdeklerin bozunmaları sonucunda, kütle numaraları değişmezken, atom numaraları 1 artıyor veya azalıyor. Çekirdeğin kendisi parçalanmayıp, içindeki nötron veya protonlardan biri, bir elektron veya pozitron ışınlayarak, proton veya nötrona dönüşmektedir. Son olarak, 7 etkin çekirdekler, bulundukları yüksek enerji durumundan daha alçak bir enerji düzeyine geçiş yapar ve sırada, iki düzey arasındaki fark kadar enerjiye sahip elektromanyetik ışınlar yayarlar.

Bunlardan alfa parçacıkları, +2 yüklü çekirdeklerden oluştuklarından, içinde ısındıkları ortamın atomlarındaki - yüklü elektronlarla ve + yüklü çekirdeklerle güçlü bir şekilde etkileşip, kısa sürede yavaşlatılırlar. Kâğıt kalınlığındaki bir katı malzeme tarafından durdurulmaları mümkündür. Fakat bu kısa mesefe içerisindeki atomların diziliminde veya moleküllerin bağlarında ciddi değişikliklere yol açarlar. Beta parçacıkları da aynı şekilde yüklü olduklarından, madde ortamıyla güçlü bir şekilde etkileşir. Fakat alfa parçacıklarından çok daha küçük olmaları nedeniyle, milimetrenin kesri düzeylerinde uzak mesafelere kadar ulaşabilirler. Halbuki gama ışınlarının maddeyle etkileşimi zayıftır. Örneğin ‘fotoelektrik olayı’nda, elektronları yörüngelerinden fırlatarak, yüksek enerjilerle iyonlaştırabilirler. Bu arada kendileri de bir miktar enerji kaybetmiş olurlar. Bu yüzden, gama ışınlarına karşı zırh malzemesi olarak





daha ziyade, atom numarası (Z) ve dolayısıyla elektron sayısı yüksek olan, kurşun gibi maddeler kullanılır. Bu üç ışın türüne, nötronlarla beraber, 'iyonlaştırıcı ışınlar' deniyor.

Isınan parçacıkların, canlı bir dokuya aktardıkları enerji miktarı, Uluslararası Standart (SI) birimi Gray (Gy) ile ölçülür. 1 Gy, "dokunun kilogram kütlesi başına 1 joule enerji aktarımı"na karşılık gelir. Ancak, dokuda yol açılan hasar, sadece enerji miktarıyla değil, bu enerjiyi aktaran parçacığın niteliğine de bağlıdır. Örneğin alfa parçacıkları, kısa mesafede büyük hasara yol açtıklarından, biyolojik olarak daha tehlikelidirler. Dolayısıyla, farklı tür ışınların dokuya verecekleri hasar potansiyeli, dokuya aktardıkları enerji miktarları, biyolojik hasar yetenekleriyle orantılı katsayılarla çarpılarak bulunur. Bu, olumsuz bir yönden 'kalite çarpanı' olarak nitelendirilebilecek olan katsayılara, 'göreli biyolojik etkinlik' (RBE) faktörü deniyor. Bu faktör, örneğin alfa parçacıkları için 20 iken, gama ışınları için 1 düzeyinde. 'Enerji miktarı' ile RBE'nin çarpımına 'doz' denmekte. 'Biyolojik doz eşdeğeri' olarak adlandırılan bu niceliğin SI birimi ise, Sievert (Sv). Örneğin 1 Gy'lik alfa ışınımının biyolojik doz eşdeğeri; 20x1 Gy=20 Sv'tir. Yaygın olarak kullanılan bir diğer birim REM (*Roentgen Eqiuvalent Man*), 1 REM=100 Sv eşitliğine tabidir. Aşağıdaki tabloda çeşitli doz düzeylerinin yol açabileceği sonuçlar kabaca gösteriliyor. Örneğin "30 günde %30 ölüm", her biri ilgili doza maruz kalmış olan nüfusun, 30 gün içinde %30'unun ölme olasılığı anlamına gelmekte.

Doz	**Belirti (semptom)**
0,05-0,2 Sv (5-20 REM)	Belirti yok
0,2-0,5 Sv (20-50 REM)	Belirti yok, alyuvar sayımı geçici olarak azalır
0,5-1 Sv (50-100 REM)	Hafif ışınım hastalığı, başağrısı, enjeksiyon riskinde artış
1-2 Sv (100-200 REM)	Hafif ışınım zehirlenmesi, 30 günde %10 ölüm
2-3 Sv (200-300 REM)	Ağır ışınım zehirlenmesi, 30 günde %35 ölüm
3-4 Sv (300-400 REM)	Ağır ışınım zehirlenmesi, 30 günde %50 ölüm
4-6 Sv (400-600 REM)	Akut ışınım zehirlenmesi, 30 günde %60 ölüm
6-10 Sv (600-1000 REM)	Akut ışınım zehirlenmesi, 14 gün içinde %100'e yakın ölüm
10-50 Sv (1000-5000 REM)	Akut ışınım zehirlenmesi, 7 gün içinde %100 ölüm

NÜKLEER SANTRAL İÇİN AYKIRI BİR SÖYLEŞİ YA DA NÜKLEER ENERJİNİN MUMU

TÜRKİYE NÜKLEER SANTRALA HAZIRLIKLI MI?

Mustafa Alp Dağıstanlı (MAD): Enerji Bakanı Taner Yıldız'ın (Murat Yetkin, *Radikal*), nükleer santraller kurmak isteyen Türkiye'nin bir kaza halinde yapılacaklarla ilgili bir yönetmeliği olmadığını söylemesi kaygı verici. Fukuşima kazasından sonra bu işe girişmişler. Demek ki, başka hazırlıklarımız da yok. Mesela bir sızıntı halinde tıbbi müdahale de gerekiyor. Acaba bu müdahaleyi yapabilecek durumda mıyız, yeterli bilgi donanımına sahip miyiz? Böyle bir tecrübemiz yok en azından. Çernobil kazası sırasında müdahale etmiş tıp ekibinin Amerikalı ve Rus başkanları, bu konunun önemli olduğunu ve özellikle Amerika'nın böyle bir kapasiteye sahip olduğunu söylüyor. Demek ki bu kapasiteye sahip olmak önemli. Ama muhtemelen başka hazırlıklar da gerekiyor. Sizce Türkiye ne kadar hazır? Ya da bu kısa zamanda halledilebilecek bir sorun mu?

Vural Altın (VA): Nükleer enerji hiç şakaya gelmez. Kömür öncesi, yani sanayi devrimi öncesi enerji kaynakları rüzgâr, güneş, hidro… Bunlar seyreltik enerjiler. Tehdit küçük, mükâfat sınırlı. Sanayi devrimi kömür üzerine kuruldu. 1 kg kömürde 30 milyon, petrolde 45 milyon Joule enerji var. Onu savaşmaya değer kılan bu. II. Dünya Savaşı'ndan sonra bir de uranyum çıktı. Doğal uranyumun kilogramında, sadece 235'i kullanırsanız, 760 milyar Joule var. 1 g uranyum 2,5 ton kömüre eşdeğer. 1000 megawatt'lık santrali 10 m^3'e sığdırıyorsunuz. Böyle yoğun üretim süreçlerinin tahribat potansiyeli yüksek. Karbon atomu yanınca 4, uranyum çekirdeği parçalanınca 200 milyon birim (eV) enerji açığa çıkıyor. Süreci daha iyi yönetmek, sıradışı durumlar için daha sıkı güvenlik sistemleri almak lazım. Yüzde 100 önlemek diye bir şey de yok. Olasılığı kabul edilebilir düzeye indirirsiniz. Bunu kabul edecek olan, toplum. Riskleri, mükâfatları tartar ve "Tamam, ben bu yolda varım veya yokum" der. İkincisi, kaza durumunda müdahalenin öncesi, sonrası var. Bu iki durum açısından

Türkiye'nin durumunu ayrıntılı bilmiyorum ama yeterince hazırlıklı olduğu kanaatinde değilim.

MAD: Bir de, hem yapım süresi, hem de maliyet planlarını aşıyor neredeyse kural olarak...

VA: Ama bizimkinin niteliği şöyle farklı Mustafa Bey. Türkiye "reaktörü sen kur, işlet, elektriğinden bu kadarını 15 yıl süreyle şu fiyattan alacağım" diyor. Yani finansman riski yapımcı firmanın sorunu oluyor. Bunun illa da bir avantaj olduğunu söylemek istemiyorum. Bu adam o kadar sıkıntıyı yaşarsa, senin güvenliğine senin arzu ettiğin, talep ettiğin düzeyde yanıt vermeyebilir, vermek zorunda da değil. Eğer firmaya "Akdeniz'de 30 metre tsunami olabilir, buna karşı önlem ilave et tasarımına" dersen, bunu haklı olarak yapmaz.

MAD: Oradaki tek sakıncanız şu son söylediğiniz şey mi, yoksa mesela santral tipi veya Ruslardaki teknoloji bakımından endişeniz var mı?

VA: Yok. O da yaygın bilinmeyen bir husus. Sovyet deneyiminin en büyük kazanımı teknoloji ve bilim derinliğidir, eğitim. Sovyetler'in de her sınıftan, her kaliteden teknolojik ürün ortaya koyma yeteneği var şimdi Rusya'nın bunca erozyona uğramış olmasına rağmen hâlâ. Dolayısıyla neye zorlarsanız onu üretir, kendi halkı için Çernobil yapar, satmak için tutar birinci sınıf reaktör. Mesela Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı, Rusların Çin'de yaptığı bir reaktörü dünyanın en güvenli reaktörü ilan etti.

MAD: Peki Türkiye neye zorladı, o belli mi?

VA: Benim kesin kanaatime göre, ilk yapılacak şey, nükleer güvenlik kurulunun oluşturulması. İki seneye yaklaşıyor, Meclis'te bu yasa. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu hem Türkiye'de nükleer araştırmaları teşvik eden bir kuruluş, hem nükleer enerjinin, (tırnak içinde) önünü açmaya çalışan, yani bu santral projelerinin gerçekleşmesi için didinip duran bir kuruluş, hem de bu süreci denetleyen bir kuruluş. Yani denetleyiciyle yapımcı aynı kefede gibi; bu, dünyanın hiçbir yerinde yok, güven de telkin etmez. 10-12 kişilik bilge adam kurulu, nükleer güvenlik konusunda oluşturacaksınız, bu adamların zaten birbirinin dilini anlaması, huyunu suyunu öğrenmesi, aynı şeyleri konuşuyor olması için birkaç yıl geçecek. Fin otoritesi, dünyanın en önde gelen nükleer mühendislerinden birini getirdi kurulun başına. Çok abartılı karmaşık bir sistem; sistem karmaşıksa denetimi de öyle. Şimdi bu projeyi yapmak için bir kurumla anlaştınız, hemen zamana karşı bir yarış başlatmak lazım, yetkin bir kurul ve yetkin ekipler tarafından. Bu ekipler, santralin bütün tasarım özelliklerini parmak ucuna indirecek, ezbere bilecek. Projeyi etkin bir şekilde, süratli ve isabetli denetleyecek; ilkini belki uzaktan, ama sonrakileri yakından. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın üyesiyiz mesela, ücretsiz hizmet sunuyor; varlık nedeni o. Ama hizmet almıyoruz bildiğim kadarıyla.

Yani her konuda ekiplerinizi bileylemeniz lazım. Oraya kazma vurulurken burada herkes başlatılan projeyi iliklerine kadar ezberiyle tanıyacak. Çünkü bir kaza durumu, bir jet uçağı yönetmek gibi, burada olaylar çok hızlı seyrediyor. Bizim tanışık olmadığımız zaman süreleri. Bir çekirdeğin parçalanması 10-12 saniye alıyor. Gücün kendini katlaması, yani bir watt gücün iki watt olması mili saniyeler alıyor, saniyenin binde biri, bu insanın algılayabileceği bir süre değil. Ama burada, "Böyle bir kurul da projeye engel olmaz mı?" diyenler bile var.

İlla her teknoloji dalında Türkiye'nin iddialı olması gerekmiyor. Ama bu üretim sürecinin riski benim halkımı ilgilendiriyor, bununla en iyi ben ilgilenirim. Yani en duyarlı olacak olan kurum TC'dir. Medvedev'in ne kadar umurunda olabilir; senin tehdit algılarına göre biçimlendirmeyebilir o projeyi. Çünkü her güvenlik önleminin bir maliyeti var, niye girsin ki altına.

MAD: Kesinlikle hazır olmadığımızı anlıyorum, kervan yolda dizilir mantığı...

VA: Benim görebildiğim tek hazırlık, bu süreci yönetebilmek için, yani anlaşmaydı, ihaleydi, nerede ne yapılabilir, adı ihale de değil, bu satın almadır biliyorsunuz, o süreci şekillendiren günübirlik bir yarış var. TAEK yoğun çalışıyor, çok iyi niyetli, çok çalışkan arkadaşlar var orada. Fakat asıl furya kazma vurulduktan sonra başlayacak.

MAD: Benim gibi bu ülkenin nükleerize edilmesinden korkan çok sayıda insan var ve işe giriş tarzımız da bu endişeyi artırıyor. Çünkü ne kadar tedbir alınırsa alınsın, nükleer endüstrinin iddia ettiğinden daha fazla kaza/arıza riski var, baktığım kaynakların söylediğine göre. Mesela, 1979'daki Three Mile Island kazasından bu yana ABD'de arıza yüzünden 46 kere bir yıl süreyle nükleer santral kapatılmış. Bir başka araştırma da 115 kere bir sızıntının eşiğinden dönüldüğünü söylüyor.

VA: Bir örnek de Kashiwazaki-Kariva santrali. 2007 Chuetsu depreminden sonra Japonlar bu santrali 21 ay süreyle kapattılar. Santralin yakınından bir fay hattının daha geçtiğini fark ettiler. Buradaki 7 reaktör, senede 60 milyar kW-s elektrik üretiyordu. Tehdit ciddi olmasa kısa sürede tesisi devreye sokarlardı. Onun için bu maliyeti sineye çektiler. Her teknoloji, toplumu yeniden yoğurur. Biraz zaman alır bu. Hazırlıklıysanız da olumludur, yani güvenlik kültürünü Türkiye'nin yerleştirmesine vesile olur

MAD: Tamam ama...

VA: Ayrı, var tabii, hesaba katılamamış olan şey var. Ama Türkiye eğer ileri teknolojik bir toplum olacaksa, her gördüğü teknoloji riskinde tabanları yağlayıp kaçarak olamaz.

MAD: Durum pek öyle bu cümlenizdeki gibi değil ama. Hesaba katılmayan hep bir şeyler oluyor. Dünyada şu anda 430 nükleer santral var ve bunların 100'ü sismik aktivitenin çok yoğun olduğu bölgelerde. Ha, ona göre yapıyoruz, denebilir. Ama Fukuşima gösterdi ki, ona göre yapılmamış. İhmal edilmiş, gözden kaçırılmış şeyler var ve deprem ve tsunami büyüklüğü de azımsanarak proje yapılmış. Tedbir, en büyük tehlike hesaba katılarak alınırsa tedbirdir. Yapımı planlanmış da en az 300 kadar nükleer santral var ve bunların büyük kısmı yine büyük deprem üretebilecek bölgelerde. Türkiye de buna dahil.

NÜKLEER ENERJİ SEÇENEĞİ NE KADAR DOĞRU?

MAD: Türkiye nükleer santral kurma kararı aldı, ama dünyada kıran kırana bir tartışma sürüyor. Çernobil felaketi hâlâ canlı hafızalarımızdayken, daha yeni başka bir ciddi kaza yaşandı Japonya'da. Bu da tartışmaları azdırdı haklı olarak...

VA: Evet tabii, ama Çernobil faciasıyla ilgili duruma bir bakalım. Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu'nun Dünya Sağlık Örgütü ile beraber yaptığı bir çalışma var. O raporun verileri ortak bilgi haline geldi. Yani çok fazla yadsınmadığını kullanımından görüyorum. Mesela çevreci gruplar da o raporun sayılarını kullanıyor. Çalışma, yanlış hatırlamıyorsam, 180 kadar bağımsız bilimcinin de katkısıyla yapıldı. Raporun sonuçları şu: 56 insan, daha doğrusu 49'u kazaya müdahale etmiş olan insanlardan öldü ki, 600 bin kadar kişi kadar müdahalede bulunmuştu. Daha sonra da aldıkları iyot dozundan dolayı 9 çocuk lösemi geliştirip öldü. O da Sovyet yönetiminin müdahalenin gecikmiş olmasından kaynaklanıyor

MAD: Hocam bir dakika... Demin de geçti aynı tema. Amerikan Ulusal Bilimler Akademisi şunu diyor: "Güvenli radyasyon maruziyeti seviyesi diye bir şey yoktur." Sosyal Sorumluluk Sahibi Hekimler de şunu ekliyor: "On yıllardır yapılan araştırmalar açıkça gösteriyor ki, herhangi bir doz radyasyon insanın kansere yakalanma riskini artırır.” Zaten medyadaki “güvenli” doz ifadesinin yanlış bilgi vermesinden yakınıyorlar.

VA: Aynı şeyi söylüyoruz; bizim meslekte “Radyasyonun şu kadarı zarar vermez, bundan ötesi zarar verir” diye bir şey yok. Güvenlik varsayımı şu: “Radyasyonun her miktarı zararlıdır.” Dozu ufak da alsanız, yüksek de alsanız kansere yol açabilir. Bunun ‘güvenlik eşiği’ yok. Ama bu varsayımın yol açtığı öyle garip durumlar var ki... Mesela 1997’de ABD’de 70 milyon CT çekildi. Bir CT 1,5 ila 15 milisievert doz veriyor; çarpın 70 milyonla, 100 milyon milisievert... 5 bin sievert öldürür. 100 bin sievert 20 bin kişiyi öldürür. Amerikan Kanser Derneği 1997’de çekilen CT’ler sonucunda 20 bin kişinin kanserden öleceğini söylüyor. Profesyonel bir örgüt. Azımsayabilir misiniz? Ama bazı bilimciler de toplumsal doz söz konusu olunca “eşik yok’ varsayımı geçersiz” diyor, “‘kolektif doz’la böyle hesap yapamazsınız...”, “20 bin insanı öldürecek kadar dozu 70 milyon insana yayarsanız, hiç kimse ölmeyebilir.” Yani, 20 bin TL’lik bir çekiliş yapıp, 70 milyon insana bilet satıyorsunuz; hiç kimseye ikramiye çıkmayabilir. “1 TL’nin altında ödeme yok” derseniz mesela... Kaldı ki; diyelim 20 bin belki ölüyor, ama erken teşhis ve tedaviyle 30 bin kurtuluyor. Kalan sağlar bizim. 10 bin kârdayız. Bu hesaplar böyle yapılıyor, sevin ya da sevmeyin; buz gibi rakamların soğuk ışığında. Akılcı olan bu.

MAD: Peki, demin de tomografi örneği vermiştiniz... Benim itirazım şu: Tomografi çektiren adamın bir derdi var, yani bir hastalık...

VA: Yarar oradan kaynaklı zaten.

MAD: Tamam da, o adam hasta olduğu için ve bir tedavi imkânı doğar diye zaten işte o kadar birime razı, onu göze alıyor. Ama diyelim ki Fukuşima’daki ya da başka bir yerde, işte Çernobil’deki insanların böyle bir derdi yok ki, yani maruz kalmayı göze almalarını gerektirecek bir sebepleri yok. Ama bu insanları maruz bırakmış oluyoruz radyasyona, ikisi arasında önemli bir fark var yani.

VA: Haklısınız. Ama ülkenin enerji geleceği, enerji ihtiyaçları için kararlar alınıyor... Türkiye enerji kaynakları itibariyle fakir. Enerjinin %70’ini ithal ediyor, 50 milyar dolar ödüyoruz, cari açığın en büyük kalemi bu. İç borçlar kontrol altında, ama dış ticaret açığı esniyor. Mesela Japonya 55 nükleer santral kurmuş. Bu riskleri bilmiyor mu? Öyle bir resim çiziliyor şimdi, “Şeytanın aklından geçmeyen oldu” deniyor. Bu doğru değil. Bu tür sistemleri kuranlar risk analizi yapıyor. Zaten orada Japon ekibin yaptığı, böyle bir kaza halinde acil durumlar el kitabını açıp madde madde izlemek. Orada sistem çalışıyor, insanlar çalışmıyor. Kahraman yok, reçete var. Kafamızı kuma gömmeyelim. Enerjinin yokluğu daha büyük felaket. Japonya'da travmanın uzamasının nedeni bu. Gıda yok mu Japonya'da? Var ama, ulaştıramıyor. Çünkü trenleri çalışmıyor. En dramatik örnek, santral. Niye kendini kontrol altına alamıyor? Sağlığı için gereken enerjiyi bulamadığından... Enerjinin yaşam içindeki yerini görmüyoruz. Onun yokluğu daha ciddi felaket. Enerji çağdaş toplumun tutkalı. Bu olmazsa toplum dağılır. Farelerin yarışı başlar. Riski dersen... Nükleer enerji, en ciddi riskleri barındırır. Çünkü yoğun. İyi yönetirsen büyük yarar. Yoksa felaket.

MAD: Riskli olduğu zaten malum. Bunun tartışmasını yapmıyoruz zaten. Hemen ulaşılabilecek bir örnek vereyim: ABD Çevre Koruma Ajansı'nın tanımı yeter bence. Bir kamu kurumundan bahsediyoruz, marjinal muhalif bir gruptan değil...

VA: Nükleer santrallere lisans veren kuruluş.

MAD: Evet. Basitçe sıralıyor nükleer enerjinin yol açacağı zararları...

VA: Yeri geldiği için söyleyeyim. Bu yaklaşımların içinde bence felsefe arızası şu: Doğa orada masum bir güzel, sedire uzanmış, insan bunun dışında bir canavar, işte kötü niyetlerle orasını burasını kurcalıyor. Böyle değil resim. İnsan da doğanın parçası; etkileriyle, faaliyetleriyle, aklıyla, çılgınlığıyla, deliliğiyle biz de doğanın parçasıyız. İnsanı doğanın dışında, üstündeymiş gibi düşünmek ... bu bize tek tanrılı dinlerin öğrettiği bir şey ve kanımca yanlış.

MAD: Evet, insan da doğanın parçası ama insanın, parçası olduğu doğayla ilişkisinde bir problem var zaten. Onu da ayrıca konuşabiliriz...

VA: Problem yaratma gücü var. Aslında her canlının var.

MAD: Belki, ama insan o gücünü kıyasıya kullanıyor.

VA: Bunlardan da öğreniyor ama, çevre bilimi diye bir şey var mıydı 30 sene önce, yani aklını aklıyla frenlemeyi biliyor, öğreniyor. Daha doğrusu öğrenmek zorunda.

MAD: Tamam da, mesele biraz da burada zaten. İnsan doğanın herhangi bir parçası değil.

VA: Değil, ayak izi çok büyük.

MAD: Büyük olmasını sağlayan şey aklı!? İşte o ayak izinin nasıl bir ayak izi olacağı konusunda bilinçli bir tercih yapabiliriz. Bir sürü yanlış tercihle geldik ve gidiyoruz... İnsan da doğanın parçası, doğada da zaten radyasyon var, biz de parçası olduğumuza göre, yaptığımız her şey yine doğal. Dolayısıyla biraz da biz radyasyon katalım... Siz bunu demiyorsunuz ama okuduklarıma bakınca, böyle bir yere doğru gidiyor. Doğada varsa zaten yeteri kadar alıyorum, fazlasını bana verme.

VA: Güzel bir soru sordunuz. Yani şimdi altını çizerek tekrarlamam gereken, nükleer enerji üretim süreci ciddi bir meseledir, şakaya gelmez. Yani ciddiye alırsanız da çok şey öğrenirsiniz, toplumu da başka tür tehditlere karşı daha iyi örgütleyebilirsiniz bu sayede. Başlangıçtaki sorunuza daha sonra dönmek kaydıyla... Fakat mesela Hiroşima-Nagasaki felaketinden sağ çıkmış olan 90 bin kişi var. Bunlar izlenmiş. 40 bini öldü şimdiye kadar. Bu 40 binden kaçı radyasyon dozu nedeniyle öldü biliyor musunuz? 690. Felaketin en büyük boyutu psikolojik.

MAD: Hocam bir dakika. Hiroşima'ya bomba atıldığı zaman ilk anda 70-80 bin kişi öldü, Nagasaki'de ise 40-50 bin kişi anında öldü.

VA: Birkaç ay içinde 100 bin, doğru.

MAD: Evet, sonraki dört ay içinde ölenlerle beraber neredeyse 250 bini buldu. Yani radyasyona fazla maruz kalanlar zaten sonraki birkaç ay içinde öldü. 690 Hibakuşa'nın (atom bombalarından kurtulanlar böyle adlandırılıyor) radrasyondan ölmüş olması, olayın psikolojik olduğunu göstermesi bakımından hiç de anlamlı değil. Ayrıca, radyasyon maruziyeti yüzünden birkaç kuşak devam eden anomaliler, sakatlıklar olduğunun tartışılır bir tarafı yok. Kesin.

VA: Ben sağ kalanlardan bahsediyordum, bombalamada ölenlerden değil. Ben, ikide bir gidip şehirlere atom bombası atalım demiyorum.

MAD: Şüphesiz.

VA: Ama şimdi bakın, reaktör alanı civarında, 20 kilometrelik alan boşaldı, değil mi? Biz neden bahsediyoruz? Nagasaki. Çapı nedir kentin? Olsun 10 kilometre, değil mi? 10 kilometrelik alan içinde sağ kalmış olan 80 bin kişiden bahsediyoruz, 690'ı radyasyon dozu nedeniyle öldü –ki burada açık alanda bir bomba patlatılıyor, hem de yerden yüksekteki doz etkisi maksimum olsun. Fukuşima'da radyasyon salınmadı değil, tabii ki salındı, zaten bir nükleer reaktörde çubuklarda gaz basıncı artınca kontrollü salımlar yapılır. Burada kontrol edilemediği için o salımın düzeyi yüksek oldu. Tabii sebzelere bulaştı, şu bu. Bombanın etkisi çok daha yüksek tabii. Ama yine de, onun etki alanından daha geniş bir bölge boşaltıldı, ta baştan...

MAD: Fransız EDF ve Alman E.ON firmasının başkanları, Britanya hükümetini tehdit ediyor: Hükümet, yenilenebilir enerji kaynaklarının payını yüzde 35'e yükseltme hedefini geri çekmezse yeni nesil nükleer santral yapmaktan vazgeçeriz.[1]

VA: Şimdi nedenini söyleyeyim. Üretim kuruluşları hükümeti izliyor, yönetimle diyalog halinde. Orada söyledikleri şu: böyle bir politikayı oluşturdunuz, gündeme getirdiniz, fakat dikkatinizi çekmek istediğimiz bir husus var, yenilenebilir enerjiye bu teşvikler çerçevesinde analizleriniz nükleerden uzaklaşıyor, yenilenebilire kayıyor, haberiniz olsun. Sanayi ve ticaret hayatı zaten böyle seyrediyor, kamuoyunun da bu tartışmalara aktif katılımı lazım, bilmesi lazım, uyanık olması lazım.

MAD: Kamuoyunun bilmesi gereken başka bir şey daha var. Birçok kaynakta gördüm fakat yine Gorbaçov'un yazısından aktarayım: 1947 ile 1999 arasında ABD hükümetlerinin nükleer enerjiye sağladığı doğrudan sübvansiyonun tutarı 115 milyar dolar. Ayrıca dolaylı sübvansiyon da var ki, onun da tutarı 145 milyar dolar. Buna karşılık rüzgâr ve güneş enerjisine ayırdığı sübvansiyon sadece 5,5 milyar dolar. Yani bu şirketlerin işleri vatandaşın vergileriyle karşılanıyor büyük oranda. Bir kaza durumunda her tür hasarı ve zararı kimin karşılayacağı da belli değil. O da büyük oranda kamunun sırtına yükleniyor. On yıl sürecek bir yapım süreci, güvenlik kaygıları dolayısıyla artan maliyetler ... Şirketler bu yükleri kendileri sırtalanamıyor ve bizim sırtımıza atıveriyorlar.

VA: ABD'de 104 santral var. Çoğu 1970-80 arasında kuruldu. 60'larda yoğun bir süreç yaşandı. Atom Enerjisi Kurumu Başkanı "Evlere saat takmayacağız" dedi, "Bedava elektrik dağıtacağız." Kazın ayağı öyle çıkmadı. Three Mile Island kazasında burnu kanayan kimse yok. Fakat 2,5 milyar dolar hasar var. Reaktör beton tabuta dönüştü. İnşa edilen bir sürü santral için EPA "Bu tasarımı şöyle değiştireceksiniz, şu güvenlik sistemini ilave edeceksiniz..." dedi. Adamlar 30-40 milyon dolarla yola çıkmış, borç alıp 100 milyona tamamlamış, onu nasıl ödeyeceğini düşünüyor. İflas eden oldu aralarında. İnşaatın süresi iki misline çıktı proje revizyonu nedeniyle. Maliyetler tırmandı. ABD' de o sıra 100 küsur milyar dolar teşvik yaptı. Ama bunu misliyle geri aldı. Yeni üretimler çıktı, en basit örneği teflon. Nükleer kapsamlı bir teknoloji, bilgiyi derinleştirir, yan dalları da zorlar. Kaldı ki, o zamanki teşvikle şimdiki teşviğin niteliği farklı. Bir kere, bilgiyi bedava verdi. Bugün proje maliyeti 5-6 milyar dolara varıyorsa buna kredi garantisi, faiz kolaylığı, vergi indirimi, satın alma garantisi –Türkiye'nin yapmaya çalıştığı gibi– cazibe unsuru katmazsanız pazara taşıyamazsınız. Devlet kendi yapmak zorunda kalır. Maliyet yüksek olur. Beni ilgilendiren asıl husus, bunun finansal felakete dönüşmesi olasılığı.

---

[1] "Green lobby and nuclear groups clash over role of renewable energy", *Guardian*, 16 Mart 2009.

MAD: Hani o zaman ekonomik mantık, pazar ekonomisi? Özel sektörü vatandaş sırtında taşıyor…

VA: Yapılması zorunlu, Akkuyu'da 20 milyar dolar… Bunu kim finanse edecek? İşte, bankalaştırılabilirliği diyorlar, zaten zayıf olan bir olay. Neden ama? Yani sizinle benim biraraya gelip kurabileceğimiz bir şey değil, konsorsiyum lazım buna. Konsorsiyuma da, öyle garantör statüsünde duran, yani kısmi garantör statüsünde duran kalıcı bir kurum lazım. Mesela TETAŞ'a bile güvenmiyorlar. TETAŞ bugün var yarın yok. Hakikaten TETAŞ'lar geliyor gidiyor. Ama Türkiye Cumhuriyeti gelip gitmiyor, TC'nin devreye girmesi gerekiyor. Batıda da böyle, çok büyük projeler kamu projesi oluyor. Mesela TC, ben hiç sermaye koymayacağım, dedi, ama satın almaya 15 yıl garanti veririm, size yer veririm, şunu sağlarım, bunu sağlarım… Öyle cazip kılmaya çalışıyorlar. Bunun dışında fazla bir şey yok. Ekonomik mantığa oturmuyor diyorsun, ama bu meseleyi sadece makul fiyatla enerji ihtiyacını giderme projesi olarak değerlendirmek lazım. 20 milyar doları, her babayiğit bulamaz, bulsa da getirip 20 milyar dolarını oraya yatırmaz. Bu projeyi 4 senede bitirirseniz zengin oluyorsunuz, darphane gibi. Hem devletin katkısını ödüyorsunuz, hem de takır takır 40 senelik ömrü boyunca çok kârlı bir proje oluyor diyelim. Dört sene yedi sene olursa, sıfıra sıfır elde var sıfır. 10 sene olursa topu dikiyorsunuz, hiç kimse ayağa kaldıramıyor.

MAD: O zaman biz sırtımızda taşıyalım! Ayrıca, gördüğüm kadarıyla, proje süresinin planlananın üzerine çıkması tarihte kalmış bir şey değil. Hâlâ böyle bir sorun var. Finlandiya yeni nesil bir santral kuruyor; proje 3 sene gecikmiş, öngörülen maliyeti de 2 milyar dolar aşmış.

VA: Hiç sorun değil Finlandiya için, anahtar teslimi vermiş. Areva 700 milyon euro zarar yazdı, yani ekstra maliyet yazdı, bir kısmını istiyor Finlandiya'dan. Finlandiya da anlaşmamız böyleydi diyor. Yapabileceği bir şey yok.

MAD: Bu da bir sorun zaten. Evdeki hesap çarşıya pek uymuyor. Süre uzuyor, maliyet yükseliyor… Bu sektörün tarihi bunlarla dolu. Buradan başka bir yere geçmek istiyorum. Nükleer enerjinin tekrar revaç bulması, küresel ısınma tehdidinin dehşeti sayesinde oldu. Ama nükleer endüstriyle içli dışlı olmamış bilimcilerin yayınları, iddia edildiğinin aksine bu teknolojinin iklim değişikliğinin sihirli iksiri olmadığını söylüyor. Nükleer santrallerin bütün hayat döngüsüne bakıldığında –uranyumun çıkarılması ve işlenmesinden başlayarak– yenilenebilir kaynaklardan daha fazla karbondioksit saldığını görüyoruz. Tabii, kömür ve doğalgaza göre iyi.

VA: Yok; bu, nükleer enerjinin ciddi sorunu değil. Santrali kurarken kullandığınız şeyleri eğer kömürle üretmişseniz; ki bu, ülkenin enerji kullanım kompozisyonuna bağlı bir şey; tabii oradan dolaylı bir fatura çıkıyor. Ama santral kendi çalışırken değil. Şimdi burada bir hipokrasi de o. Bütün üretim unsurlarını sadece nükleer santraleri değil, süte de, hatta karbondioksit yakalama aygıtlarına da, karbondioksit emisyonu yansıyor mecburen. Fin örneğini gayet iyi hatırlıyorum, en temiz onlarınki. Ama neden temiz biliyor musunuz? Finlandiya'nın enerji üretiminde zaten fosil yakıtların rolü düşük.

MAD: Şimdi Amerika enerjisinin % 20'sini aşağı yukarı nükleerden karşılıyor. O da 806 milyar kilovatsaat ediyor –2007 verisi. Şimdi bu oranı yani bütün enerji üretimi içinde nükleerin % 20'lik payını korumak için önümüzdeki birkaç sene içinde en az 35 yeni santral yapmak gerekiyor ve bu da bu kadar süre içinde imkânsız deniyor.

VA: İmkânsız,evet.

MAD: Şimdi, problemimiz neydi...

VA: Sık söylenen şey şu, yahu işte kurulması 10 sene alıyor, 10 sene sonrası için niye zahmet ediyorsun? Bu geçerli bir argüman mı? Değil. Bir kere, bir toplum enerji ihtiyacı için "ya nasılsa 10 yıl var" diyebilir mi, böyle şey olur mu?

MAD: Peki, ama zaten tartışma biraz da hiçbir şey yapmamak değil de ne yapacağız meselesinde. İtiraz, nükleer enerjinin alabildiğine sübvanse edilip yenilenebilir enerjilerin en azından yeteri kadar desteklenmemesinde. Nasıl yeni nesil nükleer reaktörlerin daha randımanlı, daha güvenli olduğunu söylüyorsunuz, gelişiyor yani, yenilenebilir enerjiler de bir atılım yapabilir. Ayrıca, enerji verimliliğinin, tasarrufun ihmal edildiği de üzerinde durulan başka bir konu.

VA: Nedeni şu ama; bakın, sürdürülebilir kalkınmanın gerektirdiği yaşam tarzına hiçbir demokratik rejim, halkını ikna edemiyor. O açıdan umut ışığı ne biliyor musunuz? Yaşayacağımız felaketlerin sayısının ve boyutlarının artması.

MAD: Güzel bir teori!

VA: Gerçekten, başka türlü öğrenemeyeceğiz gibi.

MAD: Hocam, yeteri kadar felaket gördük bence ... gerçi bu gidişle fazlasını göreceğiz zaten.

VA: Ama o anlayışın arkasında yatan gerekçeler de var. Petrolün fiyatını artırmak insanların hareket özgürlüğüne, daha doğrusu hareketliliğine direnci artırmak oluyor. Bu, toplumsal yapıda damarların sertleşmesi gibi bir şey. Kan dolaşımı rahat olamıyor.

MAD: Spor yapacaksınız işte Hocam.

VA: Doğru haklısınız da, ama analojiye limon sıktınız, sağolun.

MAD: 2009'da Stanford Üniversitesi'nde bir çalışma yapılmış; bu enerji sistemleri küresel ısınma etkisine, kirlenmeye, su arzına, toprak kullanımına, yaban hayatına etkilerine göre sıralanmış. Bütün bu bakımlardan en iyi seçenek rüzgâr, güneş, jeotermal, dalga ve hidroelektrik enerji.

VA: Ben buna katılıyorum, buraya kadar hiçbir itirazım yok. Ama hangi maliyetle? Hangi teknolojiyle? "Enerji ihtiyacımızı tümüyle nükleerle karşılayacağız, başka şey istemiyoruz" demiyor kimse. "Nükleer varken yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç yok" diyen de yok. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş kesintili, rüzgâr ve hidro değişken. Ülke, enerji ihtiyacını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayabilse, bu riski niye alsın ki? Hangi lobi, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla yeterli enerjiyi sağlayabileceğini düşünen hükümeti böyle bir zor karara nasıl ikna edebilir? Diyelim birileri buna karşı. Bakın, şu cep telefonu 20 yıl önce yoktu, şimdi herkeste var. Sabit hat şirketleri bu ürünü çelmelemek için elinden geleni yapmıştır, buna rağmen kanser gibi yayıldı, benim cebime bile girdi. Gürbüz teknolojiler öyledir, hızlı yayılır. Madem yenilenebilir kaynaklar o kadar matah; ucuz, temiz, yetkin, yeterli; biz neden hâlâ etrafımızda bir fotovoltaik güneş paneli veya rüzgâr değirmeni görmüyoruz? Bir hikmeti olsa gerek. Henüz hazır değiller, kitlesel ölçekte. Nükleer ve doğal gaz, o zamana kadarki 'geçiş dönemi' yakıtları.

MAD: Buna itirazınız olmayabilir, şöyle bir şey var. Rüzgâr, su, dalga, güneş dünya enerjisinin tamamını, %100'ünü karşılayabilir.

VA: Güneş misliyle karşılayabilir. Ama hangi maliyetle? Onun önemi yoksa mesele yok tabii. Şimdi şöyle söyleyeyim bu aşamada müsadenizle. Şunu diyen hiç kimse yok: Enerji ihtiyacımızı biz tümüyle nükleerle karşılayacağız, illa nükleer, yaşasın nükleer, başka hiçbir şey istemiyoruz.

MAD: Mümkün değil zaten.

VA: Sanki öyle bir resim doğuyor zaman zaman. İkincisi, nükleer varken yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç yok, onları boş verin... Bunu diyen de yok. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş kesintili, rüzgâr ve hidro değişken. Avrupa'da yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelirken sık sorulan bir soru, da daha doğrusu korku kaynağı da şuydu: ya herkes rüzgâra yönelirse ne yapacağız? Çünkü rüzgârı üreten, bazen de şebekeden çekmek zorunda kalıyor; kaynak değişken olduğu için. Şebeke yönetilemez hale geliyor. Tamam mı? Hem de ne zaman çekeceği belirsiz olduğu için önceden planlama da yapamıyorsunuz. Halbuki, son lafı önce mi söylesem... Hiçbir ülke, enerji ihtiyacını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayabilir durumdaysa, bu maceralara niye atlasın, bu riskleri niye göze alsın? Hangi lobi, hükümetleri eğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla yeterli enerjiyi sağlayabileceğini düşünse, ikna edebilir, böyle şakaya gelmez bir teknolojiye, bu risklere nasıl ikna edebilir?

MAD: Zaten bu bilimciler de bugün ha deyince bütün enerjiyi, dünyanın enerjisini üreteceğiz demiyorlar. Ama o "şakaya gelmez" teknolojiden bir an önce ve radikal biçimde kurtulmaya çalışmak iyi değil mi?

VA: Sen yarının enerji ihtiyacını karşılamak için burada nükleere bu kadar pay ayırmışsın, bak haftaya ümitler var, buna biraz daha fazla ayır. Bunu diyenler haklı olabilir, ama o tartımı nihayetinde karar mercileri yapıyor. Dünya manzarasına bakınca da işte Almanya bunun öncüsü, Yeşiller koalisyonu sırasında, bir itme verdi. Almanya makul bir güçle yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmak için uzun vadeli, 8-10 yıl süren bir çaba harcadı değil mi, Sosyal Demokratlarla. Neye geldi? 24 bin megavat rüzgâr gücü var Almanya'nın. Ama bu 24 bin megavat 100 bin megavatlık kömür, nükleer ve hidroya dayalı. Sırtını oraya dayamış.

MAD: Tamam şimdi dayıyor diyelim, ileride daha az dayayacak.

VA: Almanya bunu umulur ki becerir, becerebilecek yegâne ülkelerdendir, hatta Amerika'dan bile şansı bu açıdan yüksek. Çünkü bilim ve teknolojinin yanında felsefi derinliği de olan bir toplum. Amerika'da bilim ve teknoloji derinliği var ama, felsefe derinliği kitlelerde sığ; fakat biz Almanya değiliz henüz, onu bilelim. Yarınki ihtiyaçlarımızı bugünün verileriyle hesaplamak durumundayız. Bu, gelecek haftanın ümitleri; yarının ihtiyacını bu ümitler üzerine inşa edemezsiniz.

Ama mesela atıkların nihai depolanmasıyla ilgili çeşitli alternatif tasarımlar var. Fakat bunların hiçbiri, herkes için tatminkâr tasarımlar değil, sorun orada. Ama nasıl az önce dediğiniz gibi bundan işte 30-40 yıl sonra hiç bu riskleri sunmayacak bir enerji üretim süreci devreye girebilecekse, bundan 30-40 yıl sonra bu tasarımlardan biri de, herkesin 'Bu güvenlirdir' diyebileceği düzeye gelebilir.

MAD: Hiçbirimizin dilden düşürmediğimiz bir şey var: Bilimsel gelişme o kadar hızlandı ki, sıçrıyor artık, neredeyse her ay devrim niteliğinde bir ilerleme yaşanıyor. Peki, yenilenebilir enerji konusunda böyle sıçrama ihtimali neden azımsanıyor, hatta yok sayılıyor? Sadece nükleer enerjiye has bir şey mi bilimsel-teknolojik ilerleme? Onu iyileştirecek, ama öbürlerine faydası dokunamaz... *Scientific American*'da yayımlanan bir yazı, 20 yılda dünyanın bütün enerjisinin güneş ve rüzgârdan karşılanabileceğini, gerekli teknoloji için büyük bilimsel devrimler değil, birkaç yıl içinde kat edilecek aşamaların yeterli olabileceğini söylüyor. Ciddiye alıp teşvik etmeye değmez mi?

VA: Fukuşima, sizin teşvik şikâyetinizi nispeten yumuşatacak. Nükleerin maliyeti artacak. Yenilenebilire ilgi çoğalacak. Bu kazadan sonra güneşe, rüzgâra yatırım yapmaya karar vermiş bir sürü şirket vardır. Ekonomi buna kayacak, yeni nükleer santraller azalacak. Eskileri daha fazla çalışacak; yenilenebilir kaynaklar yayılana kadar, yayılabilsin diye, onları omuzlayacak, sonra kaybolacak, Fukuşima'daki 'kamikaze'ler gibi. İnsanın teknoloji macerası ironilerle dolu. Piyasa böyle çalışıyor...

ÇERNOBİL'DEN 20 YIL SONRA

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'na göre, salınan aktivite miktarı, Hiroşima'ya atılan bombanın yaydığının 400 katı, fakat 1960'lı yıllarda yapılan açık hava nükleer denemelerinin 100 ile 1000'de biri kadardı. Dolayısıyla kaza, yerel bir felaket olmakla beraber küresel bir felaket değildi. Sonuçları, o günden beridir yakın inceleme altında. Konuyla ilgili çeşitli raporlar hazırlandı. Bunlardan sonuncusu BM'in, aralarında Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu ve Dünya Sağlık Örgütü'nün de bulunduğu 8 uzman kuruluşunun,[1] Dünya Bankası'nın ve Beyaz Rusya, Rusya ve Ukrayna hükümetlerinin katılımıyla oluşturulan Çernobil Forum'u tarafından hazırlandı. 100'den fazla bilim insanı, ekonomist ve sağlık uzmanının çalışmalarını kapsayan 600 sayfalık raporun, 'Çernobil'in Mirası: Sağlık, Çevresel ve Sosyo-ekonomik Etkileri' başlıklı bir özeti 2005 Eylül ayında yayımlandı. Tarihteki en büyük nükleer kazanın 20 yıllık etkilerini değerlendiren özet raporun bulguları özetle şöyle...

SAĞLIK ALANINDAKİ ETKİLER

Kazanın ilk gününde, reaktör personelinden ve başta itfaiyeciler olmak üzere acil durum çalışanlarından yaklaşık 1.000 kadarı, aşırı yüksek düzeyde radyasyona maruz kaldı. Büyük çoğunluğu ilk ay içerisinde olmak üzere, 2005 yılı ortalarına kadar bu insanların 47'si, kazayla doğrudan ilişkili olarak öldü. 1986-87 yıllarındaki temizleme operasyonuna katılan 200.000 işçi arasında, 2.200 kadar radyasyon kökenli ölüm vakası bekleniyor. Nitekim, acil durum çalışanları arasındaki lösemi vakalarının sayısında, hafif de olsa artış var.

Daha geniş bir coğrafyaya bakıldığında; Beyaz Rusya, Rusya ve Ukrayna'nın radyoaktif serpintiye maruz kalmış bölgelerinde halen yaklaşık 5 milyon insan yaşıyor, Bunlardan 100.000 kadarının ikameti, devlet yetkilileri tarafından ‘sıkı kontrol’ bölgesi ilan edilmiş alanlarda. Kazadan sonraki ilk hafta içinde, o zamanlar genç ve çocuk olanlardan 4.000 kadarı, gerek süt içerek, otlardan inek sütüne geçmiş haliyle ve gerekse solunum yoluyla doğrudan, aşırı miktarda radyoaktif iyot-131 alarak tiroid kanserine yakalandı. Erken tanı konduğu takdirde, bu kanser türünün ameliyatla ve sonrasında olası metastazları önleyici radyoterapi yoluyla tedavisi mümkün. Beyaz Rusya’daki deneyim, %99 başarı oranı gösteriyor. Fakat ilk hafta içerisinde alınan dozla tiroid kanserine yakalanan çocuklardan, en az 9’u bu yüzden öldü.

---

[1] Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA), Dünya Sağlık Örgütü (WH0), BM Gelişme Programı (UNDP), Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), BM Çevre Programı (UNEP), BM İnsani Yardım Koordinasyon Ofisi, (UN-OCHA), BM Atomik Radyasyonun Etkileri Konusunda Bilimsel Komite (UNSCEAR).

Reaktör personeli, acil durum çalışanları ve temizleme operasyonuna katılanların oluşturduğu toplam 200.000 kişilik, kazayla doğrudan ilişkili gruba ek olarak, Çernobil bölgesinde yaşayan ve en fazla kirletilmiş olan alanlardan boşaltılan sivillerin toplam sayısı 600.000. Sonuç olarak bu nüfustaki ömür boyu kanser vakalarının %3 oranında artacağı ve en fazla radyasyon dozuna maruz kalmış olanlarından 4.000’inin, radyasyon kökenli ölümle karşılaşacağı tahmin ediliyor. Bu sayıya; kaza sırasında, hemen sonrasında veya 2005 yılı ortasına kadar ölenler dahil. Ancak, kontrol grubunun dörtte biri zaten, Çernobil kökenli radyasyondan kaynaklanmayan ‘kendiliğinden oluşan kanser’ nedeniyle öldüğünden, gelecekteki kanser vakaları arasında kazaya bağlı olanları belirlemenin zor olacağı düşünülüyor.

Bunun dışında, etkilenen bölge sakinleri arasında lösemi ve diğer kanser türlerinin arttığına dair kanıt bulunamadı. Serpintili bölgelerde yaşayanlar arasında; kısırlık, erken ya da kusurlu veya ölü doğumlara, bebeklerin genel sağlık durumlarında gerilemeye rastlanmadı. Beyaz Rusya’da kusurlu doğum oranlarında hafif bir artış görülmekle beraber, bunun, kayıtların daha yaygın ve düzgün bir şekilde tutulmasından kaynaklandığı düşünülüyor. Uzmanlara göre, kazanın potansiyel etkisi korkunç olmuş olmakla beraber, bilimsel incelemelerden elde edilen bulgulara bakıldığında, kamu sağlığı açısından sonuçları, başlangıçta korkulduğu kadar büyük olmadı.

ÇEVRESEL ETKİLERİ

Radyoaktivite salımının büyük bir kısmı, kazadan sonraki ilk on gün içinde gerçekleşti ve Avrupa’nın tümünde 200.000 km^2’lik bir alanı, yağış durumuna bağlı olarak değişen oranlarda etkiledi. Yayılan toplam aktivitenin %60 kadarı Beyaz Rusya’ya inmişti. Yarı ömrü 8 gün olan iyot-131 izotopu, kazadan sonraki birkaç ay içinde hemen tümüyle ortadan kalkmıştı. Stronsiyum-90 ve sezyum-137 gibi orta ağırlıktaki radyoaktif izotopların çoğu, reaktör civarındaki 100 km^2'lik alana yayıldı. Yarı ömrü 30 yıl kadar olan bu izotopların etkinliği, zamanla bozunma ve toprak altına inme sonucu zayıflamakla beraber, onlarca yıl daha sürecek. Uzun yarı ömürlü plütonyum ve amerisyum gibi ağır izotopların ise, aktiviteye katkısı düşük. Reaktör civarındaki 30 km yarıçaplı alan ve kısıtlı bazı bölgeler hariç, topraktaki radyoaktif çekirdeklerin, bozunma, doğal aşınma ve toprağın derinliklerine taşıma sonucunda azalmış olması, bitkilere ve hayvanlara ulaşan radyoizotop miktarlarını ciddi oranlarda azaltmış durumda. Halen ve uzun vadede; et, süt ve bazı bitkiler kanalıyla besin zincirine girmeye yatkın olan sezyum, insan sağlığı açısından en ciddi tehdidi oluşturuyor. Bu nedenle, bazı alanlarda balıkçılık, avcılık ve tarım yasaklanmış halde. Ancak, bu kontrollü alanların bir kısmının, aktivite düzeyi azalmış olduğundan, kısıtlama kapsamından çıkarılması öneriliyor.

Reaktörden 20-30 km mesafeye kadarki alanlarda, iğne yapraklı ağaçların, bazı memeliler ve toprakta yaşayan omurgasız hayvanların üreme hızlarında düşüş görüldü. Bu bölge dışında, bitki veya hayvanlarda akut radyasyon etkilerine rastlanmadı. Doz düzeylerinin düşmesine paralel olarak, biyolojik popülasyonların arttığı görülüyor. Fakat bazı bitki ve hayvanların doku ve üreme hücrelerinde genetik mutasyonlar belirlendi. Dolayısıyla, bazı orman alanları için, avcılık, ürün toplama ve odunculuk yasağı devam ediyor.

Etkilenen bölgelerin yüzey sularındaki aktivite düzeyi, bozunma, seyrelme ve tortullarla birlikte dibe çökme sonucunda hızla azalmış olmakla beraber, su sistemlerindeki besin zinciri kanalıyla gerçekleşen biyobirikim, Almanya ve İskandinavya'ya kadar uzanan bir coğrafyada bulunan bazı göllerdeki balıklarda yüksek radyosezyum konsantrasyonlarına yol açtı. Su girişi ve çıkışı olmayan bu kapalı göllerde balıkçılık yasaklandı. Ancak, düşük gelir düzeyine sahip bölgelerde bu kısıtlamalar çiğneniyor.

EKONOMİK ETKİLER

Kazanın ekonomik maliyeti içinde; doğrudan gerçekleşen hasar, müdahale ve iyileştirme çalışmalarının maliyeti, boşaltılan bölgelerdeki nüfusun yeniden yerleştirilmesi için yapılan harcamalar, etkilenen nüfusa yönelik sosyal güvenlik ve sağlık harcamaları en büyük kalemleri oluşturuyor. Bu doğrudan harcama kalemleri arasında ayrıca; çevre etkileri, halk sağlığı, alternatif ve temiz gıda üretim teknikleri, radyasyon denetimi konularında yapılan araştırmaların maliyetleri de var. Bazı tarım ve orman alanlarının kullanım dışı bırakılmış olması, Çernobil santralının kapatılması dolayısıyla oluşan enerji maliyetleri ise, dolaylı kayıpları oluşturuyor. Kazanın yer aldığı dönemde uygulanan politikalar ve Sovyetler Birliği'nin daha sonra dağılmış olması nedeniyle, kazanın ekonomik maliyetini sağlıklı olarak belirlemek pek mümkün değil. 1990'lardan bu yana yapılan çalışmalar toplam maliyeti birkaç yüz milyar dolar düzeyinde hesaplıyor.

Kazadan en büyük darbeyi yiyen sektör tarım alanı oldu. 780.000 hektardan fazla tarım, 700.000 hektara yakın orman alanı kullanım dışı bırakılmıştı. Radyoaktivite açısından temiz gıda maddelerinin üretim maliyeti; artan gübre gereksinimi, katkı maddelerinin ve özel tarım tekniklerinin kullanım gereği nedenleriyle arttı. Bu yetmiyormuş gibi, Çernobil'in gölgesi, radyasyondan etkilenmiş olsun olmasın, tüm bölgelerin tarım ürünlerinin pazarlanmasında sıkıntılara yol açtı. Gelir kayıpları, üretimin azalması ve bazı tesislerin kapatılması anlamına geldi. Sovyetleri Birliği'nin dağılmasının ardından yaşanan sarsıntılar, ekonomik gerileme ve yeni pazar mekanizmaları, bölge ekonomisinin derinden sarstı. Sonuç olarak, yaşam standartları düşerken, işsizlik ve yoksullluk arttı.

SOSYO-PSİKOLOJİK ETKİLER

116.000'i kazadan hemen sonra olmak üzere, yeniden yerleşime tabi tutulan 350.000 insan; kayıplarının tazmin edilmiş ve kendilerine, tercih ettikleri bölgelerde yeni konutlar hibe edilmiş olmasına, sağlık ve sosyal güvenlik ödemelerine bağlanmış olmalarına karşın, hızlı değişim karşısında derin bir travma yaşadı. Yaşama uyumda hâlâ zorluk çekiyorlar. Gerilim, depresyon, telaş ve tıbbi olarak açıklanamayan fiziksel rahatsızlık belirtileri geliştirdi. Belirtiler arasında, sağlığının kötü olduğu duygusu en başta geleni. 'Çernobil kazazedeleri' yerine 'Çernobil kurbanları' olarak etiketlenmiş olmaları, bu insanların kendilerini güçsüz, çaresiz, ve gelecekleri üzerinde hâkimiyet açısın zayıf bireyler olarak algılamalarına yol açmış görünüyor. Gittikleri yerlerdeki eski nüfusla aralarındaki sürtüşmeler, dışlanmışlık hislerini derinleştiriyor. Bu durum, bazılarını aşırı ihtiyatlı olmaya ve sağlığıyla ilgili abartılı endişeler taşımaya sevkederken, bazılarını da tam tersine, gözü kara davranışlara yöneltmiş. Bu ikinci grup, örneğin yüksek düzeyde aktivite içeren bölgelerden mantar, çilek vs. toplayıp yiyebiliyor veya yasak orman alanlarında avlanıp et tüketebiliyor. Alkol ve tütün tüketimi, korumasız cinsel etkinlikleri artmış durumda. Bazıları geri döndü.

Yapılan anketler, bölgelerini terk etmemiş veya geri dönmüş olanların, yaşama daha iyi bir uyum sağladığını gösteriyor. Fakat, etkilenmiş olan bölgelerdeki yaşam koşulları da, genelde kötüleşmiş durumda. Çünkü genç ve eğitimli insanlar, iş imkânlarının kısıtlılığı nedeniyle bölgeyi çoğunlukla terk etmiş. Kalan nüfusun yaş ortalaması yükseldiğinden ve yaşlı bir nüfustaki ölüm oranı daha yüksek olduğundan, bölgede yaşayanlar; kalan ömürlerinin ciddi oranda kısaldığına inanıyor ve aldıkları dozdan kaynaklanan yaşam riskini abartılı bir şekilde algılıyorlar. Bu hissiyat azalmadığı gibi giderek artıyor. Halbuki eski Sovyetler Birliği'nin tümünde ortalama ömür, radyasyon nedeniyle değil; kalp hastalıkları, artan yoksulluk ve kötüleşen yaşam koşulları, yaralanma ve zehirlenmeler nedeniyle kısalmakta.

Bu kötümser bakış açısı, sağlıksız bilgi ve hatta hurafelerin kolayca yayılmasına yol açıyor. O kadar ki, Çernobil santralı yakınındaki ormanlarda, genetik mutasyon ürünü hilkat garibelerinin dolaşmakta olduğu inancı yaygın. 'Çernobil' sözcüğü, Rusçada "siyah ot" anlamına gelen iki sözcüğün bileşiminden oluşuyor. Bunu yanlışlıkla, Yuhanna İncili'ndeki kehanetlerden birisinde geçen "tahta kurdu" olarak tercüme ettikten sonra, Çernobil kazasının İncil'de yazılı olduğunu savunanlar bile var.[2]

Rapora göre, "Çernobil'in yol açtığı psikolojik etki, kazanın bugüne kadarki en büyük halk sağlığı problemi"ni oluşturuyor. 'Çernobil kurbanları' olarak nitelendirilip, garantili sosyal güvenlik ve sağlık ödemelerine bağlanmış bulunan, ücretsiz tatil gibi özel imkânlar sunulan nüfus kesimi 5 milyona ulaşmış durumda. Rapor, bu insanların kendi ayakları üzerinde dikilip yeniden üretken hale gelmelerine yönelik politika önerileriyle son buluyor.

Kaynak

http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/e n/indexl.html

---

[2] Serge Schmemann, "Chernobyl Fallout: Apocalyptic Tale", *New York Times,* 25 Temmuz, 1986.

KAZA NASIL OLDU?

25 Nisan 1986 günü, santraldaki 4 numaralı birim, olağan bakıma alınmak üzere kapatılacaktı. Saat 01:06'da, güç indirimine başlandı. Kapatma sırasında bir türbin-jeneratör testinin yapılması planlanıyordu. Amaç, santralın elektriğinin kesilmesi halinde ve yedek güç kaynağını oluşturan dizel jeneratörün devreye girmesinden önce, boşta kalan türbin-jeneratörlerin kendi dönme momentleri sayesinde, başta acil durum kalp soğutma sisteminin pompaları olmak üzere, güvenlik donanımı için ne kadar süreyle güç sağlamaya devam edebileceğinin anlaşılmasıydı. Bu deney daha önce başka bir birimde yapılmış ve olumsuz yanıt alınınca, türbin-jeneratör tasarımında bazı değişikliklere gidilmişti. Testin bu yüzden tekrarlanması gerekiyordu. Kapatma süreci bunun için bir fırsattı.

Bu reaktör, santraldaki diğer üçü gibi; 3,3 GWt (1 GWe) gücünde, RBMK-1000 tipi, grafit yavaşlatıcılı ve su soğutmalı bir termal reaktördü. Türbin testinin, daha güvenli bir güç düzeyi sayılan 700 MWt'de yapılması kararlaştırılmıştı. Saat 3:47'de, 1,6 GWt güç düzeyine inildi. Sistemin kendini toparlaması için, burada uzunca bir süre duruldu. 14:00'da deney için gerekli olduğu üzere, 'acil durum soğutma sistemi' devre dışı bırakıldı. Bu sırada Kiev'deki şebeke müdüründen bir telefon geldi. Müdür talebi karşılamakta güçlük çektiklerini bildiriyor ve reaktörün ikinci bir bildirime kadar şebekeye elektrik vermeye devam etmesini istiyordu. Dolayısıyla, deney gece vardiyasına ertelenmiş ve 1,3 GWt düzeyinde kalınarak, güç üretimine devam edilmişti. Saat 23:10'da tekrar güç azaltımına geçildi. 24:00'da ekip değişti. Deney hazırlıklarına başlanmıştı.

26 Nisan 00:05'te güç, 720 MWt düzeyine inmiş olup, düşüşe devam etmekteydi. 700 MWt bu reaktörün, kararlı çalışma aralığının alt sınırını oluşturuyordu. Çünkü reaktörün tasarım özellikleri nedeniyle, düşük güç düzeylerindeki 'reaktivite boşluk katsayısı' pozitifti. Bu şu anlama geliyordu: Kalpte bir buhar kabarcığının oluşması halinde, içindeki su ve dolayısıyla da nötron yutucu özelliğe sahip hidrojen atomlarının miktarı azalmış olacak, zincirleme tepkimenin hızlanması sonucunda güç artacaktı. Düşük güçte iken bu etken diğerlerine baskın olduğundan, reaktörün 'güç geri besleme katsayısı'

da pozitifti. Yani 700 MWt'in altında çalışma sırasında, güç artıp da kalp ısındıkça, zincirleme tepkime hızlanıyor ve giderek daha da fazla güç üretiliyordu. Kısacası reaktör her an, alıp başını gidebilirdi ve işletme ekibi bu konuda, RBMK tasrımcıları tarafından bilgilendirilmemişti. Santral Müdürü V. P. Bruykhanov ile başmühendisi Nikolai Fomin termik santrallerde, 3 ve 4 numaralı birimlerin başmühendis yardımcısı Anatoli Dyatlov ise, küçük nükleer santrallerde çalışma deneyimine sahipti.

Saat 00:25'te güç 500 MWt düzeyine indi. Bu aşamada kalpte, güçlü bir nötron soğurucu olan Xe-135 izotopunun birikmiş olması ve nötron soğurarak zincirleme tepkimeyi yavaşlatması beklenirdi. Bu durumda operatörün reaktöre 'gereken güç düzeyini koru' sinyalini vermesi lazımdı ki, denetim sistemi kontrol çubuklarını bir miktar dışarı çekip, Xe-135'in negatif etkisini dengeleyebilsin. Halbuki operatör ya bu sinyali vermemiş, verdiyse de denetim sistemi komuta uymamıştı. Güç hızla düşerek, 30 MWt'e indi. Düşüş miktarı, işletme güvenliği kurallarının izin verdiği maksimum düzeye yakındı. Dolayısıyla, bu durumda reaktörü kapatmak, güvenlik açısından tercih edilmesi gereken yoldu. En azından gücün artırılması yönünde müdahalede bulunmamak lazımdı. Çünkü, kısa ömürlü bir radyoaktif izotop olan Xe-135'in miktarı, bozunma sonucunda zamanla azalacak ve güç zaten yukarıya doğru tırmanacaktı. İşletme ekibi buna rağmen, testin bir an önce tamamlanabilmesi için işletmeye davam kararı aldı. Hem de reaktörün, test için başlangıçta planlanan 700 MWt'lık güç düzeyine tırmanmasını beklemek yerine, 200 MWt'la yetinilecek ve test bu düşük güç düzeyinde yapılacaktı. Halbuki bu reaktör, düşük güç düzeylerinde çalışırken, 'pozitif boşluk katsayısı' nedeniyle kararsızlığa kayabiliyordu. Bu konuda bilgilendirilmemiş olan operatör, saat 00:32'de bir grup kontrol çubuğunu dışarı çekti. İşletme talimatı reaktörün içinde 26'dan az sayıda kontrol çubuğuyla çalıştırılması için başmühendisten onay alınmasını şart koşuyordu. Operatör, reaktör güvenliğinden sorumlu personelle iletişim kurmaya çalışmak yerine, izin almaksızın bu sayının altına indi

01:00'da güç 200 MWt düzeyine çıkmıştı. Test gereği türbin-jeneratör tarafından çalıştırılması gereken acil durum yedek soğutma pompalarından birisi, 01:03'te sol, bir diğeri de 01:07'de sağ soğutma devresine bağlandı. Kalbe giden su akışı artmıştı. Sonuç olarak, buhar üre-tecindeki su seviyesi azaldı. Üreteç bu durumda, reaktörü kapatmak için otomatik bir 'trip' sinyali verirdi. Operatör teste devam amacıyla, 01:15'te üretecin bu müdahale imkânını devre dışı bıraktı. 01:18'de, üreteçteki su seviyesini yükseltmek için, besleme suyunun akış hızını artırdı. Kalbe giren suyun akışındaki, dolayısıyla da nötron soğurucu hidrojen girişindeki hız artışı, negatif geri-besleme anlamına geliyordu. Güç azalacaktı. Operatör buna engel olmak için, bir dakika sonra, 01:19'da, manuel kontrol çubuklarından 7'sini daha dışarı çekti. Bu durumda büyük olasılıkla reaktördeki toplam 211 kontrol çubuğundan 204'ü dışarıdaydı. Halbuki kalpte her an için, en az 15 manuel kontrol çubuğunua eşdeğer kontrol yeteneğinin saklı tutulması şarttı. Bu sırada kalp daha iyi soğutulduğundan, üreteçte daha az buhar oluşuyordu. Operatör 01:21:40'ta, üreteçteki buhar düzeyini kararlılığa kavuşturmak amacıyla, besleme suyunun akış hızını normalin altına indirdi. Sıcaklıkla birlikte, 01:22:10'da, kalpteki buhar üretimi arttı. 01:22:45'te, kontrol panosun daki göstergeler hâlâ olağandışı bir görünüm sergilemiyordu. Operatör reaktörün kararlı olduğu kanaatine varıp, teste başlama kararı aldı. 01:23:04'te, teste başlamak üzere; türbin, besleme vanaları kapatılarak ataletiyle dönmeye bırakıldı. Vanaların kapatılması; bir yandan türbinin yavaşlamaya başlaması, diğer yandan da kalpteki basıncın artması ve sonuç olarak, içerideki su ve buharın sıkışması anlamına geliyordu. Yani, nötron yutucu hidrojen stoğu fazlalaşacak ve güç azalacaktı. Normal olarak bu 'negatif geribesleme' durumu karşısında, otomatik kontrol çubuklarını 10 saniye süreyle dışarı çekmek yeterliydi. Operatör 01:23:10'da bunu yaptı. Ardından, yine test gereği, acil durum soğutma pompalarının elektriğini kesti. Pompalar artık türbin-jeneratö-rün atalet spiniyle çalıştırılıyor, spin ise giderek yavaşlıyordu. Pompaların kalbe pompaladığı suyun debisi azalınca, içindeki buhar üretimi devam etti. Üstelik bu buhar artık türbine gidemediğinden, kalpte birikiyordu. Kalpteki buhar birikimi nötron yutucu hidrojen stoğunu azalttığından, 'güç üretimi bir de bu nedenle artma eğilimine girmişti. Buhar üretiminin devamı halinde, 'boşluk katsayısı'nın pozitif olduğu çalışma bölgesine girilecek ve güç alıp başını gidecekti. Nitekim, 01:23:21'de bu bölgeye girildi. 01:23:35'te kalpteki buhar üretimi kontrolsüz bir biçimde artmaya başlamıştı. Operatör 01:23:40'ta, 'acil durum hızlı kapatma düğmesi'ne (AZ-5) bastı. Kontrol çubuklarının hepsi birden, yukarıdan aşağıya doğru kalbe girmeye başladı. Halbuki bu reaktörün bu aşamasında bunu yapmamak lazımdı...

Çünkü kontrol çubuğu tüplerinin alt kısmı grafitle doluydu. Üstteki kontrol malzemesinden önce kalbe giren grafit, nötron yavaşlatıcı olması nedeniyle, güç artırıcı bir etken oluşturacaktı. Öte yandan, sürgü mekanizması yavaş çalışıyor ve çubukları tümüyle kalbe girmesi 18-20 saniye gerektiriyordu. Halbuki dört saniye sonra, 01:23:44'te, reaktörün gücü, tasarım değerinin 10 katına, 33 GWt'e ulaşmıştı. Kontrol çubuğu kanalları yamuldu. Çubuklar, boylarının üçte biri içeri girdikten sonra takılıp kaldı. Zincirleme tepkime durdurulmamış, reaktör kapatılamamıştı. Bir saniye sonra, 01:23:45'te, yakıt kapsülleri parçalanmaya, içinde bulundukları tüpler çatlamaya başladı. Sudan uzak durması gereken yakıtın suyla temas etmesi, şiddetli bir kimyasal tepkimenin başlamasına ve yakıt kanallarında güçlü bir basınç şokunun oluşmasına yol açmıştı. 01:23:47'de bir buhar patlaması oldu. 01:23:49'da, yakıt kanalları çatlamıştı. Kalp eriyordu. Kimyasal tepkimenin açığa çıkardığı enerjinin de katkısıyla, içindeki buhar molekülleri çılgına dönmüştü. 01:24'te kalp kapağını fırlatarak, reaktör binasının içine dolmaya başladılar. Kalbe giren su buharlaşıyor ve reaktör binasının içindeki basıncı sürekli artırıyordu. Binanın içerisinde, reaktörü kapatmaksızın yakıt değiştirmeyi mümkün kılan bir vinç sistemi vardı ve tavan yüksekliği bu nedenle 40 metre kadardı. Pahalı olacağı gerekçesiyle, koruma kabuğu yapılmamıştı. Kısa bir süre sonra ikinci bir patlama meydana gelmiş ve tavanda bir gedik oluşmuştu. Kalpteki radyoaktif uçucu gazlar dışarı çıkarken, içine hava doldu. Kızıl hale gelmiş olan grafit yavaşlatıcı bloklar, oksijenle buluşunca tutuştu. Alev alev yanmaya başlamışlardı. Atmosfere açık hale gelmiş bulunan reaktör kalbinden, dumanlarla birlikte radyoaktif parçacıklar ve yakıt zerrecikleri yükseliyordu. Yangına müdahalesi için itfaiyeye haber verildi.

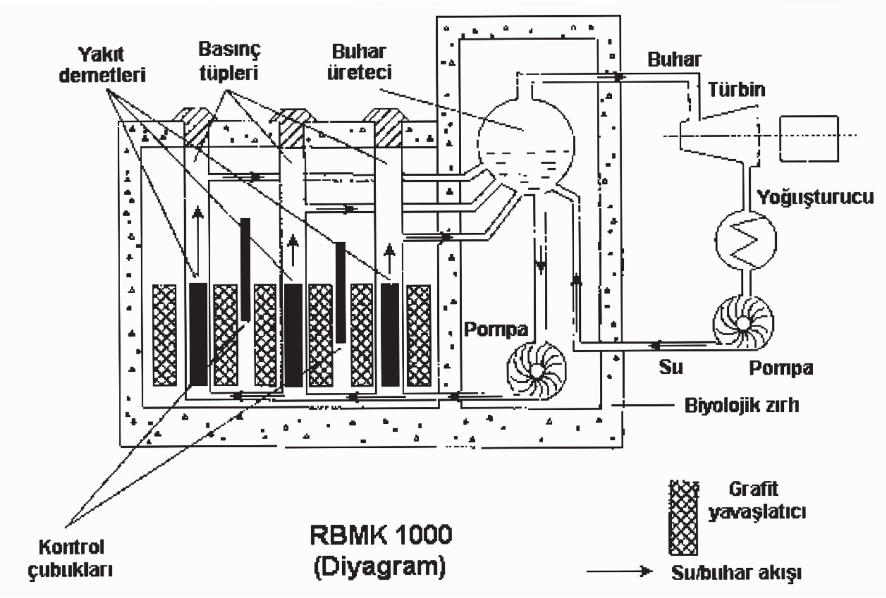
Bu aşamada atılması gereken ilk adımlardan birisi, reaktör binasındaki radyasyon düzeyini ölçmekti. 3. ve 4. birimlerdeki dozimetrelerden ikisi hariç hepsi, saniyede yalnızca 1 miliröntgen'e kadar (1 mR/s) ölçüm yapabiliyordu. Bunlar olağan çalışma koşullarında personelin doz denetimi için kullanılan, düşük kapasiteli aygıtlardı. 1000 röntgen/saat'e kadar ölçüm yapabilen iki dozimetre-den birisine erişim imkânı, patlama sonucunda ortadan kalkmıştı. Diğeri, çalıştırılmaya başlatıldığında bozuldu. 1 mR/s'lik aygıtlarsa, maksimum düzeyi gösteriyordu. 3,6 röntgen/saat'e (3,6 R/sa) eşdeğer olan bu doz, "saatte 100 röntgen'den 5 saatte 500 röntgen"lik öldürücü düzeyin çok altındaydı. Reaktörün hasar görmesi halinde, doz düzeyinin çok daha yüksek olması gerekirdi. Ekip şefi Alexander Akimov bu veriden hareketle, reaktörün bütünlüğünü hâlâ korumakta olduğu kanaatine varmıştı. Kalbe pompalanan su miktarını artırmaya çalıştı. Halbuki gerçek doz düzeyi, binanın bazı yerlerinde 20.000 R/

saat'i aşmıştı.

Çatıda çıkan yangın için çağrılan itfaiye, patlamalardan kısa bir süre sonra, 01:30'da santrale ulaştı. Ekip radyasyonun tehlikeleri konusunda uyarılmamıştı. Koruyucu giysileri yoktu. Sabah 05:00'a kadar uğraşarak yangını söndürdüler. İtfaiyecilerden birinin daha sonra anlattıklarına göre; radyasyon "metal tadındaydı" ve çalışırken yüzüne sanki, binlerce iğne birden saplanıyor gibiydi. Anlaşılan, radyasyonun dil üzerindeki ve derideki sinir uçlarında uyardığı iyonlaşmalar, beyne metal tadı ve acı duyumu sinyalleri olarak iletiliyordu. Bu arada, saat 04:30'da, radyasyon ölçümü için, güçlü bir başka dozimetre getirilmişti. Aygıt binlerce röntgen/saat'lik doz düzeyleri gösteriyor ve işletme ekibi üyeleri için bu rakam, kazanın başlangıcından beri, ölümcül dozun yüz katından fazlasının alınmış olduğuna işaret ediyordu. Buna inanamayan ekip, aygıtın bozuk olduğuna karar verdi. Özel koruma giysileri kullanmaksızın, sabaha kadar çalıştılar. Şef Akimov dahil hemen hepsi, izleyen üç hafta içerisinde ölecekti. İtfaiye erlerinin çoğu da...

Sovyet yönetiminin genelde, buna benzer konularda gizlilik yanlısı bir eğilimi vardı. Ancak, boyutları büyüyen kaza uluslararası bir tehdit haline gelmişti. Olayı incelemek üzere oluşturulan bir hükümet komisyonu 26 Nisan akşamı, kazadan yaklaşık 24 saat sonra Çernobil'e geldi. O ana kadar iki kişi ölmüş, 52 kişi de hastaneye kaldırılmıştı. Komisyon bu durum karşısında ve aşırı yüksek radyasyon düzeyi verilerinin ışığında, reaktörün tahrip olduğu sonucuna vardı. 26-27 Nisan gecesi, civar bölgenin boşaltılması kararı alındı.

Dünya bu aşamada, Çernobil'de olan bitenlerden habersizdi. 27 Nisan günü, İsveç'in Fors mark reaktöründe alarm verildi. Çalışanlardan bazılarının üzerinde radyoaktif toz parçacıklarına rastlanmıştı. Reaktör kapatılıp, ayrıntılı bir kontrolden geçirildi. Herhangi bir sızıntı bulunamamıştı. Radyasyonun kaynağı başka bir yerde olmalıydı. Rüzgâr koşulları, Rusya'nın batısındaki bir bölgeye işaret ediyordu. İlk akla gelen, Ukrayna'daki Çernobil nükleer santral kompleksi oldu. Bu tahmin doğruydu. Reaktörden çıkan radyasyon bulutu, 1 km yüksekliğe kadar tırmandıktan sonra, kuzeybatıya yönelmişti. İsveç üzerinden geçtikten sonra güneye doğru yönelip, Doğu Avrupa ülkelerinin üzerinden geçerek, Trakya'ya ulaştı. Karadeniz bölgesinin kuzey kesimini de dolaşan bulut, başta iyot-135 olmak üzere uçucu radyoaktif gazlar ve stronsiyum-90 ve sezyum-135 ile, az miktarda da olsa, plütonyum gibi ağır izotopların bulaştığı toz parçacıkları içeriyordu. Aksi raslantı sonucu, yol boyunca gerçekleşen


Yakıt demetleri
Basınç tüpleri
Buhar üreteci
Buhar
Türbin
Yoğuşturucu
Pompa
Su
Pompa
Biyolojik zırh
Grafit yavaşlatıcı
Kontrol çubukları
RBMK 1000 (Diyagram)
Su/buhar akışı

yağışlar, bulutun radyoaktivite stoğunu bazı bölgelerde yere indirdi. Özellikle Sr-90 ve Cs-137 toprağa karışmış ve bitkiler tarafından emilmeye başlanmıştı. İsveç, Çernobil'de ciddi bir nükleer santral kazasının yer almış olabileceğini, aynı gün dünyaya duyurdu.

Kazadan sonraki 36. saatten başlamak üzere, hafta sonuna kadar, santral yakınındaki Prip-yat kasabasının 50 bin nüfus dahil, 116.000 kişi bölgeden uzaklaştırılmıştı Girilmesi yasak ilan edilen bölge daha sonra, reaktörü merkez alan 30 km yarıçapında bir daireye genişletildi ve 200 bin insan daha başka bölgelere yerleştirildi. Kazayı izleyen bir hafta içerisinde reaktör binası, üzerine helikopterlerle toplam 5.000 ton ağırlığında kum torbaları yığılmış ve üstü uzaktan kumandalı robotların yardımıyla betonlanarak, bir lahite çevrilmişti. Grafit yangını ancak 10. günde söndürülebildi. Bu arada ikinci bir radyasyon bulutunun salımı daha yaşandı. Bir süre beklendikten sonra, boşaltılan bölgedeki yüzey serpintisinin temizlenmesi için iki yıla yayılan bir çalışma başlatıldı. Bu operasyonda, 200 bin kişi çalıştı.

DİZİN

ağır su 254, 277, 290
Akimov, Alexander 323
Aristoteles 41, 42
Arşimed ilkesi 218
Atom Enerji Ajansı 14
Avrupa Uzay Ajansı 96

Becquerel, Henry 293
Berzelius, Jon Jakobs 265
Bethe, Hans 253
Bock's Car 263
Bohr, Niels 236, 242, 244
Breit, Gregory 253
Bruykhanov, V. P. 321
Bunsen, Robert 155
Bush, Vannevar 252, 253
Büyük İskender 43
Büyük Patlama 40
Büyük Yokoluş 91

CANDU tipi reaktör 290
Carnot döngüsü 119, 120
Carnot, Sadi 119
Cavendish, Henry 44, 45
Chandler yalpası 96
Clausius, Rudolph 119
Compton, Arthur 252, 254
Coriolis, Gaspard-Gustave 116
Coriolis kuvveti 63
Curie, Marie 294
Curie, Pierre 293

Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi 287
Çernobil 286, 302, 303, 305, 306, 315, 316, 318, 319, 324, 325
Davy, Sir Humphry 138
Descartes, Rene 115
devr-i daim makinesi 211, 212, 214, 218, 223, 225, 226, 233
difüzyon 145, 252, 289
dinamo 181
Dirac, Paul 240
doğalgaz 172, 174
Doppler etkisi 55
Doppler kayması 99
Duff, Michael 38
Dyatlov, Anatoli 321

Einstein, Albert 210, 236, 262
Ekvator koordinat sistemi 75
elektrik alanı motoru 224
enerjinin korunumu ilkesi 211
Enola Gay 263
Everett, Hugh 234, 242, 244

Faraday kafesi 223, 224
Faraday, Michael 181
Fat Man 260, 261, 262, 263
Fermi, Enrico 254, 256, 260, 262
Feynman, Richard P. 39, 229, 230
Fomin, Nikolai 321
fosil yakıt 135, 175
fotovoltaik paneller 194
Francis türbini 208
Franklin, Benjamin 55

Galileo Galilei 54
gaz difüzyonu 248, 252, 254
Gold, Thomas 143
Gould, Stephan Jay 40
görelilik kuramı 210
Groves, Leslie 253, 255, 259, 262
Güneş lekeleri 97
güneş panelleri 199, 204
güneş pompaları 189
Güneş sabiti 65

Hawking, Stephen 40
Heisenberg'in belirsizlik ilkesi 69
Heisenberg, Werner 236, 238
Hipparkos 95, 96

Hiroşima 262, 263, 308
Hubbert'in Zirvesi 174, 175
Hubbert, M. K. 150

ışıma spektrumu çizgileri 69

İlkbahar Gündönümü 83
İngiliz Kraliyet Topluluğu 225
itki tipi türbin 205, 207
iyon pompası 233

Johannes Taisnierus 225
Joule, James Prescott 119

Kaplan türbini 206
Kış Dönencesi 83
Kireneli Eratostenes 42, 43, 44
Kont Rumford 119
kuantum mekaniği 235
Kudryavtsev, Nikolai 143
kütleçekimi makinesi 213
Kyoto Protokolü 175

Laplace, Pierre-Simon 120
Lavoisier, Antoine-Laurent 119
Lawrence, Ernest 252, 254
Leibniz, Gottfried Wilhelm 115, 116
Little Boy 260, 261, 262, 263
Litvinenko, Alexander 292, 293, 299
Los Alamos 254, 255, 257, 259, 261, 262
Lukasiewicz, Ignacy 147

Manhattan Projesi 253, 262, 263, 264
Mariana Çukuru 48
Markoni 55
Marko Polo 147
Marshall, James 253
Maxwell, James Clerk 233
Mayer, Julius Robert von 119
Michell, John 45
Milankoviç döngüleri 65
Murphree, Eger 252

Nagasaki 262, 263, 308
Neddermeyer, Seth 258
Neumann, John von 258
Newton, Isaac 37, 115, 116, 120, 212
Newton yasaları 44, 210, 211, 212, 213, 219, 227, 229
nükleer enerji santralleri 285, 286
nükleer reaktör 285
Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması 287

Okun, Lev B. 37
Oppenheimer, J. Robert 253, 254, 262

Pascal 223
Paul A. M. Dirac 214
Pauli'nin dışlama ilkesi 107
Pelton türbini 204, 205, 206, 207
petrol 142, 143, 144, 145, 146, 172
Planck, Max 27
plütonyum 12, 249, 250, 252, 254, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 270, 271, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 317, 324
polonyum 255, 292, 293, 294, 295, 296, 297
Poncelet, Jean-Victor 116
Prusya Bilimler Akademisi 27
Pu-240 izotopu 257
Pythagoras 41

Rabbia, Carlo 10
Rokke, Doug 13, 15
Roosevelt, Franklin D. 252, 262
Rubbia, Carlo 274
rüzgâr türbini 176, 179, 180, 198, 199, 204

sanal iş ilkesi 213
San Andreas fay hatları 50

Sefeid değişkeni 98
Segre, Emilio 257
Sera etkisi 70
sera gazı 66, 71, 164
Shockley, William 24
Sklodosvska, Marie 293
Sonbahar Gündönümü 83
Stevin problemi 221
Stevin, Simon 212, 213
su türbinleri 198, 199, 204
süperyağlama 113

Taisnierus aygıtı 225
Teller, Edward 253
tepki tipi türbinler 206
Tolman, Richard 253
Toricelli, Evangelista 53, 54
toryum 9 ,11, 264, 266, 267, 270, 271, 273, 274, 277
triboloji 113
Truman, Harry S. 262
Tuck, James 258
Türkiye Atom Enerjisi Kurumu 303

U-235 izotopu 9, 248, 258, 285
Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı 303, 304, 315
Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu 305
uranyum 12, 13, 131, 248, 249, 250, 252, 253, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 267, 268, 270, 271, 273, 276, 278, 280, 281, 283, 284, 285, 286, 288, 289, 290, 294
Urey, Harold 252

Van Ailen radyasyon kuşağı 58

Wheeler, John Archibald 242, 244, 260
Wigner, Eugene 242
Wilczek, Frank 28
Wilkins, John 225
William Congreve 221
William Gilbert 225

Xe-135 izotopu 321

Yaz Dönencesi 83

Zeno 215
Ziya ül Hak 290
Zonca, Vittorio 223

2012 yılında beklenmedik şekilde aramızdan ayrılan Prof. Dr. Vural Altın'ın bilim yazılarının büyük bölümünü kapsayan **Dünya ve Enerji**, dünyanın iç yapısını, yeraltı kaynaklarını, atmosferini, sera gazlarını ele alan ve güncelliğini kolay kolay yitirmeyecek temel meselelerin yanı sıra devr-i daim makinelerinden Manhattan Projesi'ne, fotovoltaik güneş panellerinden alternatif kaynaklı konut güç sistemlerine uzanan birçok meraklı konuyu açık ve sade bir dille ele alıyor.

Prof. Dr. Vural Altın, üniversite eğitimini University of California, Berkeley'de İnşaat Mühendisliği alanında tamamladıktan sonra aynı üniversitede Nükleer Mühendislik alanında yüksek lisans ve doktora çalışmaları yapmıştır. 1977 yılından emekli olduğu 2003 yılına dek Boğaziçi Üniversites'inden öğretim üyesi olarak çalışmış, çok sayıda uluslararası makale yayımlamıştır. Enerji mühendisliği alanında dersler vermenin yanı sıra **TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi**'nde yazdığı yazılarla yıllarca katkıda bulunmuştur.

9 786054 238989

BOĞAZİÇİ ÜNİVERSİTESİ YAYINEVİ